



TUGAS AKHIR - TE 141599

**EVALUASI KEGAGALAN SETTING RELE DIFERENSIAL
PADA BUS 18 KV DI SISTEM KELISTRIKAN PLTU UP
PAITON UNIT 1**

Rizkaurum Nur Fadliyah
NRP 2213 100 042

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiانتara, M.T.
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE 141599

**FAULT EVALUATION OF DIFFERENTIAL RELAY
SETTING ON 18 KV BUS IN PLTU UP PAITON UNIT 1
ELECTRICITY SYSTEM**

Rizkaurum Nur Fadliyah
NRP 2213 100 042

Advisor
Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

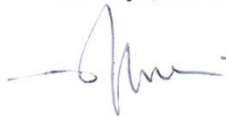
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“EVALUASI KEGAGALAN SETTING RELE DIFERENSIAL PADA BUS 18 KV DI SISTEM KELISTRIKAN PLTU UP PAITON UNIT 1”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2017



Rizkaurum Nur Fadliyah

NRP. 2213 100 042

**EVALUASI KEGAGALAN SETTING RELE
DIFERENSIAL PADA BUS 18 KV DI SISTEM
KELISTRIKAN PLTU UP PATTON UNIT 1**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing 1

Dosen Pembimbing 2

**Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
NIP. 1966 03 18 1990 10 1 001**

**Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 1981 09 05 2005 01 1 002**



EVALUASI KEGAGALAN SETTING RELE DIFERENSIAL PADA BUS 18 KV DI SISTEM KELISTRIKAN PLTU UP PAITON UNIT 1

Nama : Rizkaurum Nur Fadliyah
Pembimbing I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
Pembimbing II : Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Sistem proteksi harus dapat bekerja untuk memutus arus gangguan yang muncul pada sistem dengan cepat dan selektif. Adanya sistem proteksi tersebut berfungsi untuk melindungi peralatan dari kerusakan dan pemadaman akibat adanya arus gangguan. Sistem proteksi juga berfungsi untuk membatasi dampak gangguan sehingga kontinuitas suplai daya ke beban tetap optimal. Sistem Kelistrikan di PLTU UP Paiton Unit 1 memiliki sistem distribusi radial dengan busbar 18 kV. Dalam pengoperasiannya busbar tidak terlepas dari kondisi abnormal. Kondisi abnormal pada busbar bersifat merusak. Proteksi diferensial ini digunakan sebagai proteksi utama busbar karena dapat bekerja dengan cepat dan selektif untuk mengisolasi gangguan. Pada PLTU UP Paiton Unit 1 pernah terjadi kesalahan setting rele diferensial bus yang menyebabkan ketika terjadi gangguan di luar daerah pengamanan rele diferensial tersebut bekerja. Pada Tugas Akhir ini akan dilakukan analisis kegagalan setting rele diferensial bus pada sistem distribusi radial 18 kV di PLTU UP Paiton Unit 1. Hasil analisis tersebut akan digunakan sebagai referensi untuk menentukan setting rele diferensial bus yang tepat. Sehingga sistem proteksi busbar dapat bekerja dengan cepat dan selektif dalam memutus arus gangguan. Berdasarkan perhitungan, rekomendasi setting rele diferensial bus yang disarankan adalah I_{diff} sebesar 1,25 A atau 1,5 A dan slope sebesar 75%.

Kata kunci : evaluasi setting rele, *percentage differential relay*, proteksi busbar

Halaman ini sengaja dikosongkan

FAULT EVALUATION OF DIFFERENTIAL RELAY SETTING ON 18 KV BUS IN PLTU UP PAITON UNIT 1 ELECTRICITY SYSTEM

Name : Rizkaurum Nur Fadliyah
Advisor I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
Advisor II : Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

The protection system must be able to trip fault current to the power system quickly and selectively. The function of this protection system is to protect the equipment from damage and blackouts due to the fault current. The protection system also capable to limit the impact of fault so that the continuity of power supply to the load remains optimal. Electricity System in PLTU UP Paiton Unit 1 has a radial distribution system with 18 kV busbar. In its operation the busbar is can't be separated from the abnormal condition. Abnormal condition on the busbar are destructive. This differential protection is used as the main protection busbar because it can work quickly and selectively to isolate the disturbance. In PLTU UP Paiton Unit 1, there has been an error setting of the differential bus that causes when occur disturbance outside the security area, differential relay tripped. In this Final Project will be analyzed failure of arrangement on unit 18 kV in PLTU UP Paiton Unit 1. The results of the analysis will be used as a reference to determine the appropriate setting of the differential bus. The way the busbar protection system can work quickly and selectively through the fault current. Based on the calculation, recommendation of differential relay's setting is I_{diff} for 1,25 A or 1,5 A and slope for 75%.

Keywords : busbar protection, evaluation relay setting, percentage differential relay

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul:

“EVALUASI KEGAGALAN SETTING RELE DIFERENSIAL PADA BUS 18 KV DI SISTEM KELISTRIKAN PLTU UP PAITON UNIT 1”

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis menyadari bahwa tanpa adanya dukungan dan bantuan dari berbagai pihak selama masa penelitian ini sangatlah sulit bagi penulis untuk dapat menyelesaikannya. Oleh karenanya penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Dr. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng selaku Ketua Departemen Teknik Elektro.
2. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara dan Bapak Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, saran, serta masukan bagi penulis.
3. Seluruh dosen Departemen Teknik Elektro ITS yang telah membina dan memberikan ilmu kepada penulis selama menempuh pendidikan di Teknik Elektro ITS.
4. Ayah, Ibu, dan keluarga tercinta yang senantiasa memberikan motivasi dan doa yang tidak terbatas.
5. Rekan-rekan asisten Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST) ITS.
6. Teman-teman seperjuangan angkatan 2013 selama kuliah di Teknik Elektro ITS.
7. Anita Sintya Damaryanti, Shofie Rizki Fadhila, Utami Pangestu, Pitri Mirawati, Tri Puji Astuti, Maisita Eka Listianingrum, Restantiana Rahmania Putri, Prima Swastika, Bagus Kurniawan Susanto, Taufani Kurniawan, Vincentius Raki Mahindhara, Chandra Dwi Prasetyo, dan teman-teman Ikemas Surabaya yang selalu memberikan motivasi kepada penulis.

8. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Besar harapan penulis bahwa buku Tugas Akhir ini dapat memberikan informasi dan manfaat bagi pembaca pada umumnya dan mahasiswa Departemen Teknik Elektro pada khususnya. Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan dan masih jauh dari kesempurnaan sehingga saran dan kritik yang membangun sangat dibutuhkan.

Surabaya, Juni 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK i

ABSTRACT iii

KATA PENGANTAR..... v

DAFTAR ISI..... vii

DAFTAR GAMBAR..... ix

DAFTAR TABEL xi

BAB 1 PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Perumusan Masalah..... 2

1.3 Tujuan..... 2

1.4 Batasan Masalah..... 2

1.5 Metodologi 2

1.6 Sistematika Penulisan..... 6

1.7 Relevansi dan Manfaat 6

BAB 2 PROTEKSI BUSBAR PADA SISTEM KELISTRIKAN..... 7

2.1 Busbar..... 7

2.2 Transformator Arus (*Current Transformer*)..... 8

2.3 Gangguan Hubung Singkat 12

2.4 Rele Diferensial 17

2.5 *Low Impedance Bus Differential Relay* 19

2.6	<i>GE Multilin B30 Bus Differential System</i>	26
BAB 3 SISTEM KELISTRIKAN PLTU UP PAITON UNIT 1		29
3.1	Sistem Kelistrikan PLTU UP Paiton Unit 1	29
3.2	Kapasitas Pembangkitan	29
3.3	Sistem Distribusi di PLTU UP Paiton Unit 1	30
3.4	Data Beban di PLTU UP Paiton Unit 1	32
BAB 4 HASIL SIMULASI DAN EVALUASI KEGAGALAN SETTING RELE DIFERENSIAL PADA BUS 18 kV DI SISTEM KELISTRIKAN PLTU UP PAITON UNIT 1		35
4.1	Pemodelan Sistem Kelistrikan PLTU UP Paiton Unit 1....	35
4.2	Analisis Arus Gangguan Hubung Singkat	35
4.3	Analisis Kondisi Eksisting Setting Rele Diferensial Bus..	36
4.5	Rekomendasi Setting Rele Diferensial Bus	40
BAB 5 PENUTUP		59
5.1	Kesimpulan	59
5.2	Saran	60
DAFTAR PUSTAKA		61
BIOGRAFI PENULIS		63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 <i>Flowchart</i> Metodologi Tugas Akhir.....	5
Gambar 2. 1 Daerah proteksi busbar	8
Gambar 2.2 Kontruksi transformator arus.....	9
Gambar 2.3 Rangkaian ekuvalen transformator arus	10
Gambar 2.4 Perbedaan kurva magnetisasi CT proteksi dan pengukuran	11
Gambar 2.5 Kurva magnetisasi baja silikon dan baja nikel	12
Gambar 2.6 Arus pada kondisi normal.....	13
Gambar 2.7 Arus pada kondisi hubung singkat	13
Gambar 2.8 Karakteristik arus hubung singkat	14
Gambar 2.9 Pemodelan hubung singkat tiga fasa	15
Gambar 2.10 Pemodelan hubung singkat antar fasa	16
Gambar 2.11 Pemodelan hubung singkat satu fasa ke tanah	17
Gambar 2.12 Pemodelan rele diferensial pada kondisi normal	18
Gambar 2.13 Pemodelan rele diferensial saat gangguan eksternal	18
Gambar 2.14 Pemodelan rele diferensial saat gangguan internal.....	19
Gambar 2.15 Skema <i>low impedance bus differential</i>	20
Gambar 2.16 Skema rele diferensial dengan <i>restraining coil</i>	22
Gambar 2.17 Kurva karakteristik <i>percentage current differential</i>	24
Gambar 2.18 Karakteristik <i>percentage differential</i> dengan 1 slope	25

Gambar 2.19 Karakteristik <i>percentage differential</i> dual slope – 1 Bkp.	26
Gambar 2.20 Karakteristik <i>percentage differential</i> dual slope – 2 Bkp.	26
Gambar 2.21 Karakteristik <i>diferensial bias GE Multilin B30</i>	27
Gambar 3.1 <i>Single line diagram</i> PLTU UP Paiton Unit 1	29
Gambar 4.1 Pemodelan rele diferensial bus.....	36
Gambar 4.2 Pemodelan 87B saat gangguan di BFP A 10kV	40
Gambar 4.3 Pemodelan 87B saat kondisi normal	41
Gambar 4.4 Pemodelan 87B saat hubungsingkat L-L di UNIT BUS-1A	43
Gambar 4.5 Pemodelan 87B saat hubungsingkat L-L di UNIT BUS-1B	44
Gambar 4.6 Pemodelan 87B saat hubungsingkat L-L di BUS LINK	46
Gambar 4.7 Pemodelan 87B saat hubungsingkat 3 phasa di UNIT BUS-1A	47
Gambar 4.8 Pemodelan 87B saat hubungsingkat 3 phasa di UNIT BUS-1B	49
Gambar 4.9 Pemodelan 87B saat hubungsingkat 3 phasa di BUS LINK	50
Gambar 4.10 Pemodelan 87B saat hubungsingkat L-L di U1-AT 18 kV	53
Gambar 4.11 Pemodelan 87B saat hubungsingkat 3 phasa di Bus U1-AT 18 kV	55
Gambar 4.12 Kurva karakteristik rele diferensial ($I_{diff} = 0,625 \text{ A}$)	56
Gambar 4.13 Kurva karakteristik rele diferensial ($I_{diff} = 1,5 \text{ A}$).....	57

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data kapasitas pembangkit PLTU UP Paiton Unit 1	29
Tabel 3.2 Data level tegangan bus di PLTU UP Paiton Unit 1	30
Tabel 3.3 Data Rangkuman Pembangkitan dan Pembebanan PLTU Paiton Paiton Unit 1	30
Tabel 3.4 Data transformator sistem distribusi PLTU UP Paiton Unit 1	31
Tabel 3.5 Data beban motor induksi di PLTU UP Paiton Unit 1	32
Tabel 3.6 Data beban motor induksi di PLTU UP Paiton Unit 1(<i>lanjutan</i>).....	33
Tabel 3.7 Data beban lumped load di PLTU UP Paiton Unit 1	33
Tabel 4.1 Data arus hubung singkat $\frac{1}{2}$ cycle.....	36

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Fungsi sistem proteksi adalah untuk memutus arus gangguan yang muncul dengan cepat dan selektif. Ketika arus gangguan muncul maka sistem proteksi harus dapat memutus arus gangguan tersebut dengan cepat sebelum terjadi kerusakan pada peralatan serta membatasi dampak gangguan agar tidak meluas ke seluruh sistem. Oleh karena itu, sistem proteksi harus disetting sedemikian rupa agar sistem proteksi tersebut dapat melakukan fungsinya dengan baik.

Unit Pembangkitan Paiton merupakan perusahaan yang bergerak di bidang pembangkitan listrik. Pembangkit ini mengoperasikan 2 unit PLTU dengan total kapasitas 800 MW. Energi listrik yang dihasilkan kemudian didistribusikan melalui SUTET 500 kV Sistem Interkoneksi Jawa-Bali. Secara keseluruhan, terdapat 6 unit pembangkit listrik yang mengalirkan listrik Jawa-Bali yaitu unit 1 dan 2 dengan kapasitas 800 MW, unit 3 dan 4, unit 5 dan 6 dengan kapasitas 1260 MW, unit 7 dan 8 dengan kapasitas 1200 MW, serta unit 9.

Sistem distribusi yang digunakan pada UP PLTU Paiton Unit 1 adalah sistem distribusi radial 18 kV. Pada distribusi radial 18 kV ini terdapat sistem proteksi tambahan yaitu proteksi diferensial yang berfungsi melindungi busbar. Busbar merupakan bagian yang berfungsi sebagai tempat terhubungnya semua bus, baik bus line maupun bus trafo. Dalam pengoperasiannya busbar tidak terlepas dari kondisi abnormal atau gangguan. Kondisi abnormal pada busbar bersifat merusak. Apabila terjadi gangguan pada busbar, maka kemungkinan terjadi kerusakan pada peralatan instalasi sangat besar. Hal ini akan menyebabkan pasokan daya terganggu.

Proteksi diferensial ini digunakan sebagai proteksi utama busbar karena dapat bekerja dengan cepat dan selektif untuk mengisolasi gangguan.

Pada PLTU UP Paiton Unit 1 pernah terjadi kesalahan setting rele diferensial bus yang menyebabkan ketika terjadi gangguan hubung singkat di luar daerah pengamanan rele diferensial tersebut bekerja. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis kegagalan setting rele diferensial bus pada sistem distribusi radial 18 kV di PLTU UP Paiton Unit 1. Hasil analisis tersebut akan digunakan sebagai referensi untuk menentukan setting rele diferensial

bus yang tepat. Sehingga sistem proteksi busbar dapat bekerja dengan cepat dan selektif dalam memutus arus gangguan.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah :

1. Sejak dibangun sampai saat ini sistem proteksi bus 18 kV pada PLTU UP Paiton Unit 1 belum pernah dilakukan studi kelayakannya.
2. Evaluasi terhadap sistem proteksi bus 18 kV di PLTU UP Paiton Unit 1 untuk menjamin keandalan dari sistem kelistrikan secara keseluruhan.
3. Menentukan nilai setting rele diferensial bus 18 kV di PLTU UP Paiton Unit 1 dengan perhitungan.

1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah :

1. Memodelkan, mensimulasikan, dan menganalisis sistem kelistrikan di PLTU UP Paiton Unit 1.
2. Melakukan analisis setting rele diferensial bus pada sistem distribusi radial 18 KV di PLTU UP Paiton Unit 1.
3. Mendapatkan rekomendasi setting rele diferensial bus pada sistem distribusi radial 18 KV yang diperlukan untuk keandalan dan stabilitas PLTU UP Paiton Unit 1.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah mengkoordinasikan dan mengatur :

1. Sistem kelistrikan yang dikaji merupakan sistem kelistrikan di UP PLTU Paiton Unit 1.
2. Peralatan proteksi yang dibahas adalah rele diferensial bus (87B) dengan *percentage biased differential protection*.
3. Manufaktur rele diferensial yang digunakan untuk proteksi bus 18 kV adalah *GE Multilin B30 Bus Differential System*.

1.5 Metodologi

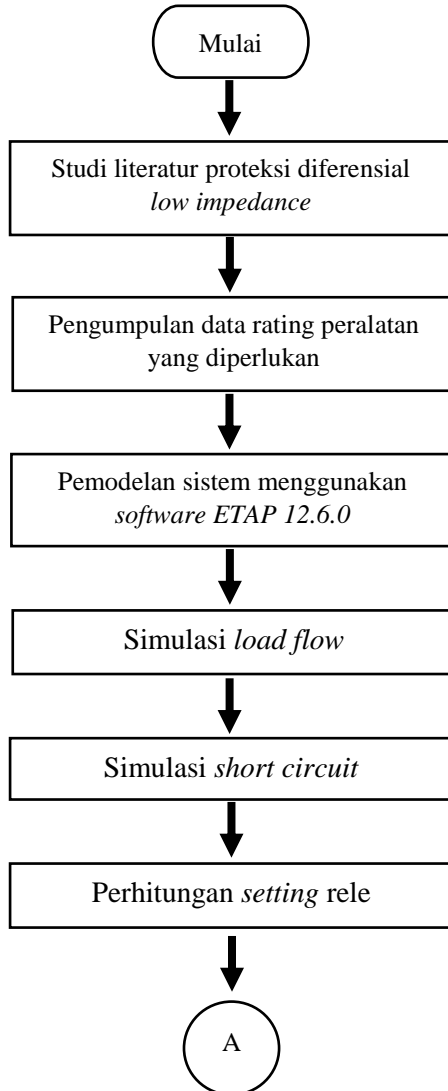
Dilakukan tahapan pengerjaan Tugas Akhir sebagai berikut:

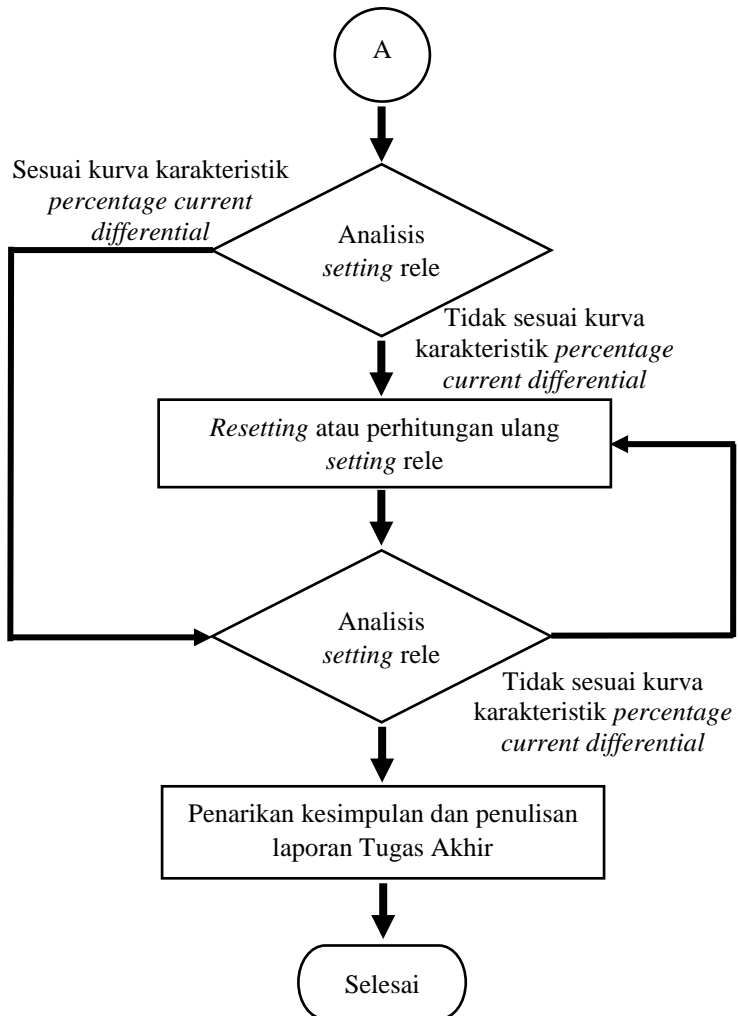
1. Studi Literatur

- Mempelajari referensi-referensi yang berkaitan dengan proteksi diferensial *low impedance* yang berkaitan dengan masalah yang dihadapi.
2. Pengumpulan Data
Mengumpulkan data-data yang berkaitan dengan sistem kelistrikan PLTU UP Paiton Unit 1 meliputi *single line diagram* dan data peralatan yang digunakan seperti *rating* transformator, bus, generator.
 3. Pemodelan Sistem
Memodelkan sistem kelistrikan PLTU UP Paiton dalam bentuk *single line diagram* menggunakan *software ETAP 12.6.0* Pemodelan ini bertujuan agar dapat melakukan analisis *load flow* dan *short circuit*.
 4. Simulasi *Load Flow*
Simulasi yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui aliran daya serta tegangan pada setiap bus di sistem kelistrikan PLTU UP Paiton Unit 1.
 5. Simulasi *Short Circuit*
Simulasi yang dilakukan yaitu simulasi *short circuit* minimum pada setiap bus di PLTU UP Paiton Unit 1 ketika terjadi gangguan internal dan eksternal. Nilai *short circuit* minimum adalah saat *short circuit* antar fasa. Nilai arus gangguan tersebut akan digunakan untuk *setting* rele proteksi diferensial.
 6. Perhitungan *Setting Rele*
Paramater-parameter yang telah diperoleh dari hasil simulasi akan digunakan sebagai komponen untuk melakukan perhitungan nilai *setting* rele diferensial bus *low impedance*. Parameter-parameter *setting* rele diferensial bus *low impedance* terdiri dari I_{diff} , $I_{Restraint}$, dan *slope*.
 7. Analisis *Setting Rele*
Menganalisis nilai I_{OP} , I_R , dan *slope* yang telah diperoleh untuk menentukan *setting* rele diferensial bus *low impedance* sudah tepat. Analisis *setting* rele dilakukan dengan cara mengplot parameter *setting* pada *microsoft excel*. Menentukan hasil plot telah sesuai dengan kurva karakteristik *percentage current differential*. Apabila tidak sesuai, maka perlu dilakukan *resetting*.
 8. Penarikan Kesimpulan
Setelah melakukan analisis hasil pengujian, maka ditarik suatu kesimpulan berdasarkan kondisi-kondisi yang ada. Kesimpulan

ini juga diakhiri dengan saran atau rekomendasi terhadap penelitian selanjutnya.

Secara umum, proses penelitian dapat dijelaskan melalui *flowchart* berikut ini:





Gambar 1.1 Flowchart Metodologi Tugas Akhir

1.6 Sistematika Penulisan

Pada tugas akhir ini terdiri atas 5 bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut :

Bab 1 : PENDAHULUAN

Bab ini meliputi latar belakang permasalahan, tujuan, batasan masalah, penjabaran mengenai metodologi pengerjaan, sistematika penulisan dan manfaat dari tugas akhir.

Bab 2 : PROTEKSI BUSBAR PADA SISTEM KELISTRIKAN

Bab ini menjelaskan mengenai teori – teori dan kajian pustaka yang berkaitan dalam penggunaan tugas akhir ini.

Bab 3 : SISTEM KELISTRIKAN PLTU UP PAITON UNIT 1

Bab ini menjelaskan mengenai sistem kelistrikan pada PLTU Paiton Unit 1

Bab 4 : HASIL SIMULASI DAN ANALISIS PROTEKSI DIFERENSIAL BUS 18 KV PADA PLTU PAITON UNIT 1

Bab ini menjelaskan hasil simulasi yang telah dilakukan dengan *software* ETAP 12.6. Bab ini juga berisi perhitungan *setting* sistem proteksi bus dengan menggunakan parameter yang telah diperoleh dari hasil simulasi serta rekomendasi untuk mendapatkan sistem proteksi yang dapat bekerja dengan baik jika terjadi gangguan hubung singkat pada busbar.

Bab 5 : PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari hasil analisis yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi dan Manfaat

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat membawa manfaat sebagai berikut:

1. Untuk PLTU UP Paiton Unit 1

Melalui tugas akhir ini, diharapkan penentuan *setting* parameter rele dapat dijadikan sebagai acuan pada proteksi rele diferensial bus 18 kV pada sistem kelistrikan PLTU UP Paiton Unit 1.

2. Untuk bidang ilmu pengetahuan

Dapat menjadi referensi mahasiswa lain yang hendak mengambil masalah serupa pada tugas akhirnya.

BAB 2

PROTEKSI BUSBAR PADA SISTEM KELISTRIKAN

Sistem proteksi merupakan bagian yang sangat penting dalam suatu sistem kelistrikan. Berdasarkan IEEE Std. 242-2001 [1], fungsi utama sistem proteksi dan koordinasinya adalah melindungi peralatan apabila terjadi gangguan dengan membatasi durasi kejadian gangguan baik akibat kesalahan manusia, kegagalan peralatan, maupun fenomena alam yang tidak terhindarkan. Selain itu, fungsi lain dari sistem proteksi adalah mengisolir dan meminimalkan kerusakan pada peralatan yang terkena gangguan sehingga gangguan tidak meluas dan kerugian yang timbul akibat gangguan tersebut dapat diminimalisir. Arus gangguan yang mengalir pada sistem tenaga listrik menyebabkan beroperasinya rele proteksi dan menggerakkan pemutus tenaga (*Circuit Breaker*) sehingga aliran daya yang mengalir terputus.

2.1 Busbar

Busbar merupakan titik pertemuan atau hubungan antara transformator tenaga, saluran udara, saluran kabel atau peralatan listrik lainnya yang berfungsi untuk menerima dan menyalurkan energi listrik.

Peralatan proteksi busbar dirancang untuk mengamankan peralatan busbar ketika terjadi gangguan hubung singkat pada busbar. Gangguan hubung singkat pada busbar jarang terjadi, namun apabila terjadi dampaknya sangat besar terhadap ketahanan peralatan instalasi, menimbulkan masalah stabilitas transient, dan menimbulkan pemadaman yang meluas. Oleh karena itu fungsi proteksi busbar adalah mencegah kerusakan peralatan instalasi dan mencegah pemadaman secara menyeluruh (*blackout*). Terdapat syarat-syarat yang harus diperhatikan dalam penggunaan sistem proteksi busbar, antara lain [2] :

a. Kecepatan

Sistem proteksi busbar harus bekerja dalam waktu singkat tanpa adanya penundaan waktu (*time delay*) untuk mengisolasi gangguan. Tujuan utamanya adalah mengamankan kontinuitas pasokan daya dengan cara mengisolasi gangguan.

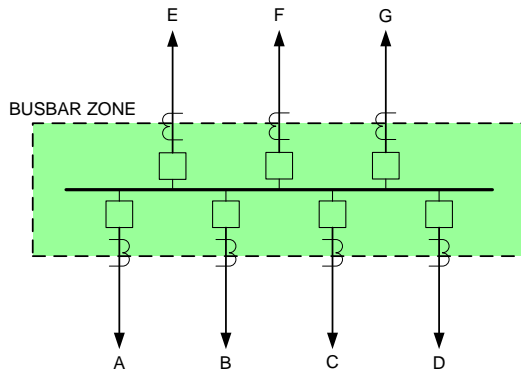
b. Selektifitas

Selektifitas pada sistem proteksi adalah kemampuan rele proteksi untuk melakukan pemilihan *tripping* secara tepat sesuai pada area yang terjadi gangguan. *Tripping* dengan menggunakan CB terdekat sesuai dengan rencana yang telah ditentukan saat mendesain sistem proteksi tersebut. Rele hanya bekerja selama kondisi tidak normal atau gangguan yang terjadi di daerah pengamanannya dan tidak akan bekerja pada kondisi normal atau pada gangguan yang terjadi di luar daerah pengamanannya.

c. Kemanan

Sistem proteksi busbar harus tetap stabil ketika gangguan eksternal. Hal ini menjadi perhatian ketika mendesain sistem proteksi busbar karena ketika terjadi arus gangguan eksternal bernilai besar dapat menyebabkan arus yang dihasilkan pada sekunder CT tidak linier dengan primer CT sehingga pada kondisi ini terdapat kemungkinan rele salah bekerja.

Daerah kerja proteksi busbar adalah daerah di antara semua trafo arus (CT) bay yang tersambung pada busbar tersebut. Sistem proteksi busbar harus bekerja tanpa tunda waktu (*instantaneous*) apabila terjadi gangguan di dalam zona proteksinya (area warna hijau) seperti diperlihatkan pada Gambar 2.1. Namun untuk gangguan yang terjadi di luar zona proteksiannya (di luar area warna hijau), proteksi busbar tidak boleh bekerja (rele harus stabil) [3].

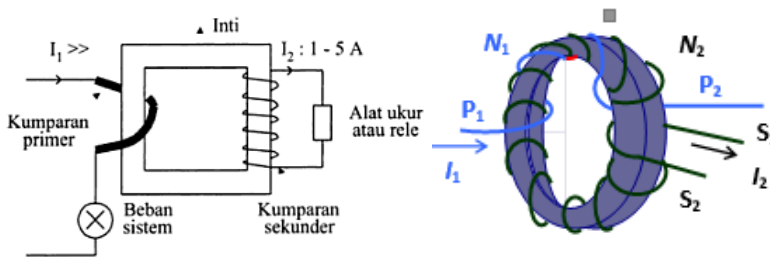


Gambar 2. 1 Daerah proteksi busbar

2.2 Transformator Arus (*Current Transformer*)

Current Transformer (CT) merupakan suatu peralatan yang berfungsi mentransformasikan besaran arus listrik agar dapat diaplikasikan untuk keperluan pengukuran ataupun proteksi. CT digunakan apabila arus

yang mengalir melalui jaringan terlalu besar sehingga tidak sesuai dengan *rating* peralatan pengukuran maupun proteksi. Selain itu, CT juga berfungsi untuk mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primernya. Gambar konstruksi transformator arus ditunjukkan pada gambar 2.2 sedangkan rangkaian ekuivalennya dapat dilihat pada gambar 2.3. Kumparan primer *current transformer* dihubungkan seri dengan jaringan sedangkan kumparan sekundernya dihubungkan dengan rele proteksi.



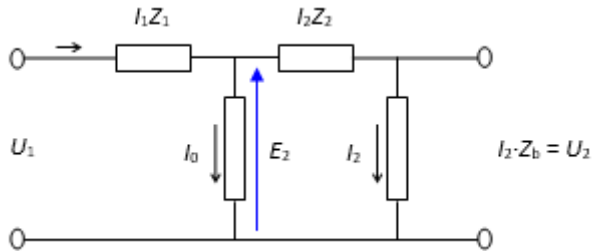
Gambar 2.2 Kontruksi transformator arus

Current transformer yang terhubung seri dengan jaringan sehingga kumparan primer CT harus mampu memikul arus hubung singkat yang terjadi pada jaringan. Apabila CT rusak ketika kumparan primernya dialiri arus hubung singkat maka rele proteksi yang menjadi beban CT tidak bekerja sehingga terjadi kegagalan proteksi peralatan. *Current transformer* untuk keperluan proteksi dirancang sedemikian sehingga mampu mengalirkan arus hingga 10 kali arus nominalnya [4]. Prinsip kerja tranformator arus sama dengan transformator daya 1 fasa. Ketika arus I_1 mengalir pada kumparan primer maka akan timbul gaya gerak magnet sebesar $N_1 I_1$ yang kemudian menghasilkan *fluks* pada inti. *Fluks* tersebut kemudian akan mengalir menuju kumparan sekunder dan menghasilkan tegangan terinduksi (E_2) pada kumparan sekunder. Apabila terminal pada sisi sekunder tertutup maka pada kumparan sekunder mengalir arus I_2 . Arus I_2 akan menimbulkan gaya gerak magnet $N_2 I_2$ pada kumparan sekunder. Apabila pada *current transformer* tidak terdapat rugi-rugi daya atau merupakan transformator ideal maka berlaku persamaan :

$$N_1 \times I_1 = N_2 \times I_2 \text{ atau } \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.1)$$

Dalam hal ini :

- N_1 : Jumlah belitan kumparan primer
 N_2 : Jumlah belitan kumparan sekunder
 I_1 : Arus kumparan primer (A)
 I_2 : Arus kumparan sekunder (A)



Gambar 2.3 Rangkaian ekuivalen transformator arus

Tegangan induksi (E) pada sisi sekunder :

$$E_2 = 4,44 \cdot B \cdot A \cdot f \cdot N_2 \text{ Volt} \quad (2.2)$$

Tegangan jepit (V) rangkaian sekunder :

$$E_2 = I_2 \cdot (Z_2 + Z_b) \text{ Volt} \quad (2.3)$$

$$Z_b = Z_{kawat} + Z_{inst} \text{ Volt} \quad (2.4)$$

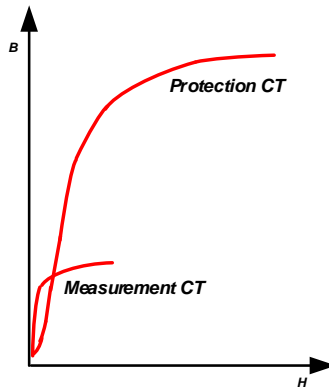
Dalam hal ini :

- B : Kerapatan fluks (Tesla)
 A : Luas penampang (m^2)
 f : Frekuensi (Hz)
 N_2 : Jumlah belitan sekunder
 U_1 : Tegangan sisi primer (V)
 U_2 : Tegangan sisi sekunder (V)
 Z_b : Impedansi beban CT
 Z_{kawat} : Impedansi kawat dari CT ke instrumen

Z_{inst} : Impedansi instrumen (ampermeter atau rele proteksi)

Kurva magnetisasi adalah kurva yang menggambarkan karakteristik dari inti sebuah transformator dengan menunjukkan hubungan antara Kerapatan Medan Magnetik (B) dengan Intensitas Medan Magnetik (H).

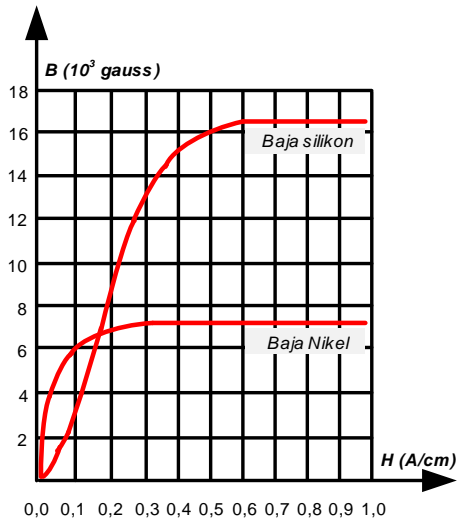
Trafo arus untuk proteksi memiliki kerapatan medan magnetik (B) yang lebih besar dibandingkan dengan trafo arus untuk pengukuran [5]. Semakin besar kerapatan medan magnetiknya (B), maka tegangan jenuh atau saturasinya semakin tinggi. seperti ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Perbedaan kurva magnetisasi CT proteksi dan pengukuran

Gambar 2.4 menunjukkan bahwa nilai kerapatan medan magnetik (B) trafo arus untuk proteksi lebih tinggi dibandingkan dengan kerapatan medan magnetik untuk trafo arus untuk pengukuran. Oleh karena dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai kerapatan medan magnetiknya, maka tegangan jenuh atau saturasinya lebih tinggi.

Current transformer untuk keperluan proteksi yang berakurasi tinggi dapat diperoleh dengan inti transformator yang terbuat dari bahan campuran besi-nikel. Permeabilitas bahan ini relatif tinggi, tetapi menghasilkan gaya gerak listrik rendah karena saturasi kerapatan medan magnetik (B) yang dihasilkannya rendah [4]. Pada gambar 2.5 menunjukkan kurva magnetisasi baja silikon dan baja besi.



Gambar 2.5 Kurva magnetisasi baja silikon dan baja nikel

Inti *current transformer* untuk keperluan proteksi dibuat dari campuran baja-silikon karena bahan tersebut mempunyai saturasi rapat medan magnetik yang tinggi yaitu diatas 16×10^3 gauss [4].

2.3 Gangguan Hubung Singkat

Sistem proteksi harus dapat memutus arus gangguan yang muncul dengan cepat dan selektif. Oleh karena itu, pemilihan rele proteksi harus mempertimbangkan hal-hal sebagai berikut [1] : proteksi maksimum, biaya peralatan minimum, proteksi yang handal, operasi cepat, desain simpel, dan sensitivitas tinggi terhadap gangguan serta tidak sensitif terhadap arus beban normal.

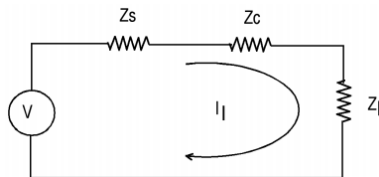
Gangguan hubung singkat dalam sistem tenaga listrik dapat dikelompokkan kedalam 2 jenis yaitu gangguan hubung singkat simetri dan gangguan hubung singkat tidak simetri (asimetri). Gangguan yang termasuk jenis gangguan hubung singkat simetri adalah gangguan hubung singkat 3 fasa sedangkan gangguan yang lainnya merupakan gangguan hubung singkat tak simetri. Gangguan asimetri ini menyebabkan fasa yang

mengalami gangguan akan mengalami arus lebih sedangkan fasa yang tidak terganggu akan mengalami kenaikan tegangan.

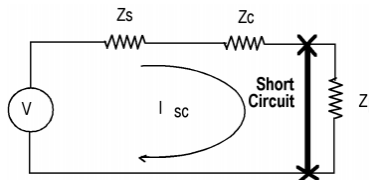
Sebagian besar gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik adalah gangguan tidak simetri. Gangguan tidak simetri ini terjadi sebagai akibat gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, gangguan hubung singkat dua fasa, atau gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah.

Adanya gangguan hubung singkat dapat mengakibatkan rusaknya peralatan listrik, berkurangnya stabilitas daya, dan terhentinya kontinuitas daya akibat membukanya *circuit breaker*.

Pada kondisi normal [1], arus adalah suatu aliran akibat adanya beda potensial pada suatu impedansi dalam sebuah sistem. Pada gambar 2.6 dapat diketahui bahwa total arus yang mengalir pada sistem adalah sumber tegangan dibagi dengan total impedansi sistem. Akan tetapi, pada kejadian hubung singkat seperti yang ditunjukkan gambar 2.7, dapat dimisalkan suatu impedansi mengalami hubung singkat akibat terdapat sebuah konduktor yang dipasang secara paralel dengan impedansi tersebut.



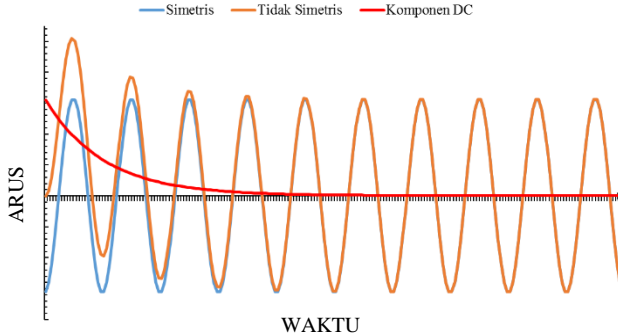
Gambar 2.6 Arus pada kondisi normal



Gambar 2.7 Arus pada kondisi hubung singkat

Karena pada kondisi hubung singkat terdapat pengurangan impedansi (akibat *short* oleh konduktor), maka arus hubung singkat tentu akan lebih besar daripada arus normal. Selain itu, perubahan kondisi sistem dari normal menjadi hubung singkat terjadi dengan sangat cepat, akan tetapi sistem pada umumnya yang bersifat induktif tidak dapat mengalami perubahan arus secara seketika, maka dari itu munculah sebuah arus tidak

simetris (*asymmetrical current*) dengan magnitude yang lebih tinggi daripada arus hubung singkat. Kejadian ini terjadi secara singkat dan akan kembali menjadi keadaan simetris. Karakteristik arus hubung singkat dapat diilustrasikan seperti gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.8 Karakteristik arus hubung singkat

Kejadian hubung singkat dibagi kedalam beberapa periode yaitu: *sub-transient* (0,5 cycle), *transient* (1,5-4 cycle), dan *steady state*. Pembagian durasi hubung singkat ini dikarenakan adanya komponen reaktansi yang berbeda. Selanjutnya fungsi pembagian durasi tersebut dapat digunakan sebagai data untuk menentukan kapasitas *circuit breaker* (CB) maupun *setting* relay.

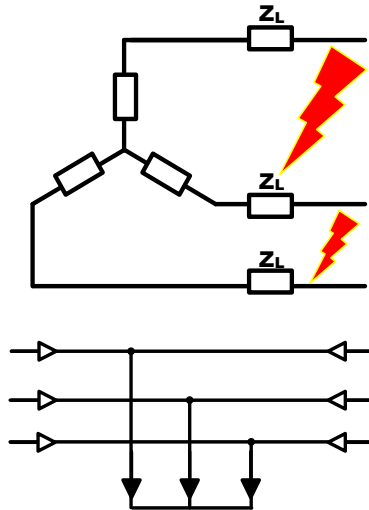
Ketika terjadi gangguan maka sistem proteksi tersebut harus dapat segera memutus gangguan. Adanya gangguan pada sistem tenaga listrik juga dapat menyebabkan rusaknya peralatan listrik serta terhentinya kontinuitas suplai daya ke beban. Perhitungan praktis untuk menentukan besarnya arus hubung singkat dapat ditentukan melalui perhitungan berikut [6] :

- Hubung singkat 3 fasa

Hubung singkat ini terjadi ketika 3 fasa sekaligus terhubung ke tanah. Dalam sistem kelistrikan, kemungkinan terjadinya sebesar 5%. Pemodelan hubung singkat 3 fasa dapat dilihat pada gambar 2.9. Nilai arus kejadian hubung singkat ini merupakan yang paling besar yang dapat diformulasikan melalui persamaan berikut:

$$I_{sc} 3\phi = \frac{V_{LN}}{X_1} \quad (2.5)$$

Dimana V_{LN} adalah tegangan *line to netral* dan X_1 adalah reaktansi urutan positif.



Keterangan :

➡: Arah arus hubung singkat

↡: Arah arus kontribusi hubung singkat

Gambar 2.9 Pemodelan hubung singkat tiga fasa

- Hubung singkat antar fasa

Hubung singkat ini terjadi ketika 2 fasa saling terhubung namun tidak terhubung ke tanah. Hubung singkat dua fasa memiliki persentase kemungkinan terjadi sebesar 15%. Nilai hubung singkat dua fasa ini sering disebut dengan arus hubung singkat minimum karena banyaknya jumlah impedansi yang berpengaruh. Pemodelan hubung singkat antar fasa dapat dilihat pada gambar 2.10. Arus hubung singkat antar fasa dapat ditentukan melalui persamaan berikut :

$$I_{sc\ 2\phi} = \frac{V_{LL}}{X_1 + X_2} \quad (2.6)$$

Dimana V_{LL} adalah tegangan *line to line* dan X_2 adalah reaktansi urutan negatif. Jika X_1 sama dengan X_2 maka :

$$I_{sc} 2\phi = \frac{V_{LL}}{2X_1} \quad (2.7)$$

karena :

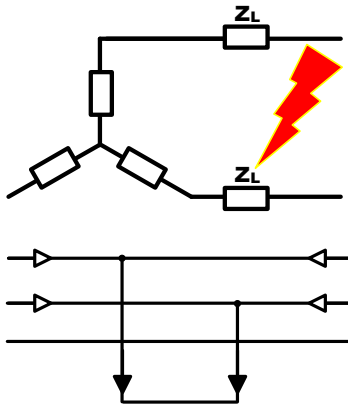
$$V_{LL} = \sqrt{3} V_{LN} \quad (2.8)$$

Sehingga :

$$I_{sc} 2\phi = \frac{\sqrt{3} V_{LN}}{2X_1} \quad (2.9)$$

apabila mengacu pada persamaan (2.1), maka :

$$I_{sc} 2\phi = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{sc} 3\phi \quad (2.10)$$



Keterangan :

—→: Arah arus hubung singkat

—→: Arah arus kontribusi hubung singkat

Gambar 2.10 Pemodelan hubung singkat antar fasa

- Hubung singkat 1 fasa ke tanah

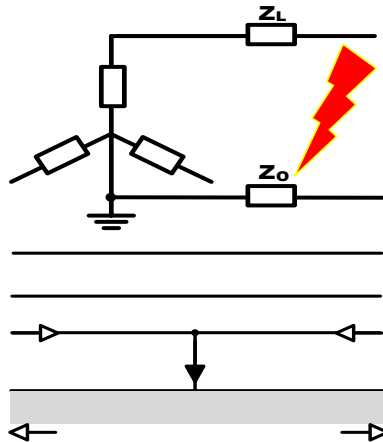
Hubung singkat ini terjadi ketika salah satu fasa terhubung ke tanah. Besarnya arus hubung singkat ini tergantung jenis pentanahan yang digunakan pada sistem. Kejadian hubung singkat yang paling sering terjadi pada sistem kelistrikan dengan persentase sebesar 80%. Hubung singkat ini terjadi saat salah satu phasa terhubung dengan tanah baik melalui *body* peralatan maupun sentuhan dengan peralatan lain (disebut juga sebagai *ground fault*). Pemodelan hubung singkat 1 fasa ke tanah dapat dilihat pada gambar 2.11. Arus hubung singkat 1 fasa ke tanah dapat ditentukan melalui persamaan berikut :

$$I_{sc} 1\phi = \frac{3 \times V_{LN}}{X_1 + X_2 + X_0 + Z_G} \quad (2.11)$$

Dimana Z_G adalah impedansi ke tanah. Apabila Z_G minimum atau mendekati nol, dan X_1 sama dengan X_2 dan X_0 , maka :

$$I_{sc} 1\phi = \frac{V_{LN}}{X_1} \quad (2.12)$$

$$= I_{sc} 3\phi \quad (2.13)$$



Keterangan :

➡: Arah arus hubung singkat

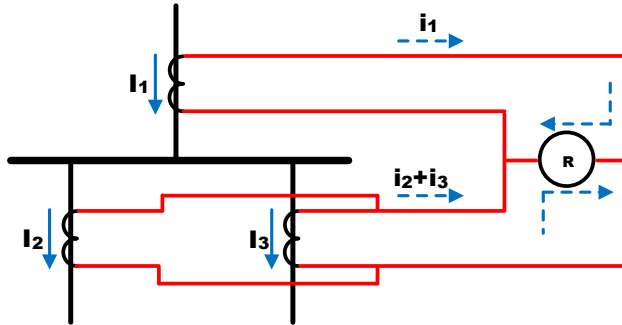
↡: Arah arus kontribusi hubung singkat

Gambar 2.11 Pemodelan hubung singkat satu fasa ke tanah

2.4 Rele Diferensial

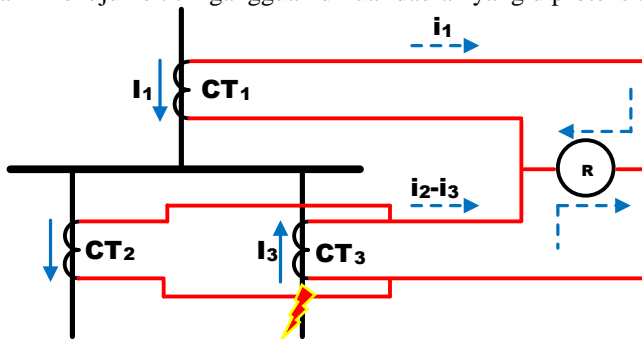
Prinsip kerja rele diferensial mengacu pada hukum kirchoff yaitu keseimbangan jumlah arus antara jumlah arus yang masuk dan jumlah arus yang keluar pada suatu titik. Rele diferensial hanya bekerja jika terjadi gangguan pada daerah yang diproteksi dan tidak terpengaruh dengan adanya gangguan akibat beban lebih. Rele diferensial digunakan sebagai pengaman utama karena sifatnya yang dapat bekerja dengan kecepatan tinggi serta sangat selektif mengamankan gangguan. Proteksi diferensial ini digunakan antara lain pada generator, transformator, motor, dan bus. Pada

kondisi normal arah aliran arus akan mengalir seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Pemodelan rele diferensial pada kondisi normal

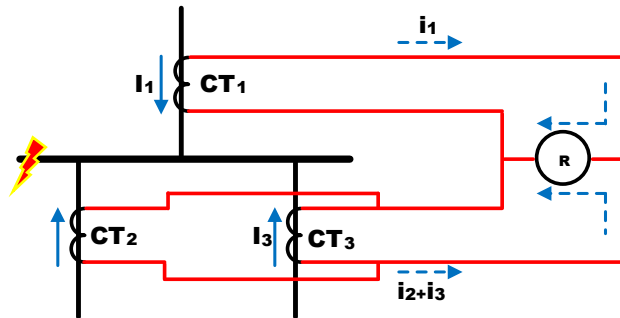
Saat kondisi normal, besar arus I_1 akan sama dengan jumlah arus I_2 dan I_3 atau $I_1 = I_2 + I_3$. Dengan demikian jumlah arus yang masuk dan keluar daerah yang diproteksi akan tetap sama sehingga rele diferensial tidak akan bekerja. Hal ini tetap berlaku meskipun telah terjadi *overload* atau kelebihan beban pada sistem [7]. Sedangkan kondisi saat terjadi gangguan eksternal seperti pada gambar 2.13 maka arus gangguan akan mengalir menuju ke titik gangguan di luar daerah yang diproteksi.



Gambar 2.13 Pemodelan rele diferensial saat gangguan eksternal

Saat terjadi gangguan eksternal maka besar arus I_2 akan sama dengan jumlah arus I_1 dan I_3 atau $I_1 = I_2 - I_3$. Perubahan tanda I_3 disebabkan

karena perubahan arah arus I_3 akibat terjadi gangguan eksternal pada feeder I_2 . Dalam kondisi tersebut maka tetap terjadi keseimbangan antara jumlah arus yang masuk dan arus yang keluar pada daerah yang diproteksi. Dengan demikian maka rele diferensial tidak akan bekerja. Sedangkan untuk gangguan internal maka arus gangguan akan mengalir menuju daerah yang diproteksi seperti pada gambar 2.14.



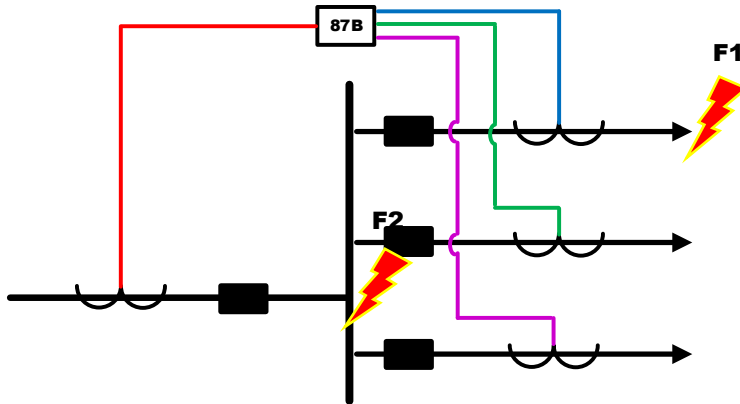
Gambar 2.14 Pemodelan rele diferensial saat gangguan internal

Pada saat terjadi gangguan internal maka tidak terjadi keseimbangan antara jumlah arus yang masuk dan arus yang keluar pada daerah tersebut karena seluruh arus mengalir menuju titik gangguan. Hal ini mengakibatkan rele akan segera bekerja memberikan sinyal *trip* ke *circuit breaker* yang terpasang pada setiap feeder *incoming* dan *outgoing* yang terhubung dengan busbar tersebut.

2.5 Low Impedance Bus Differential Relay

Low impedance bus differential relay bekerja dengan cara menjumlahkan arus-arus yang melalui bus dibatasi oleh CT yang tersambung ke rele diferensial (87B). Pada keadaan normal atau gangguan di luar bus yang diamankan, jumlah arus yang melalui bus tersebut adalah nol. Sedangkan pada keadaan terjadi gangguan di bus yang diamankan, jumlah arus yang melalui bus tersebut tidak sama dengan nol [8]. Pada gambar 2.15 menunjukkan skema instalasi rele diferensial bus tipe impedansi rendah saat terjadi gangguan eksternal di F1 dan gangguan internal di F2 [9]. Daerah yang diproteksi oleh rele diferensial (87) dibatasi

oleh primer CT yang terpasang pada setiap *incoming* dan *outgoing* yang terhubung pada daerah yang diproteksi tersebut. Sedangkan sekunder CT terhubung dengan rele diferensial (87).



Gambar 2.15 Skema *low impedance* bus differential

Proteksi rele diferensial bekerja terhadap gangguan sekecil mungkin. Sehingga *circuit breaker* dapat segera mengisolasi gangguan. Namun *pickup setting* harus cukup aman sehingga rele diferensial tidak bekerja akibat arus diferensial palsu. Pada saat kondisi normal terdapat kemungkinan muncul arus tidak seimbang yang disebut arus difirensial palsu yang dapat menyebabkan 87B salah kerja. Penyebab timbulnya arus tidak seimbang antara lain saturasi CT yang menyebabkan arus sekunder CT tidak lagi linier terhadap arus primer CT dan perubahan posisi *tap changer* transformator daya. Untuk mencegah arus gangguan (I_F) yang besar di luar bus yang diamankan maka pada rele diferensial dipasang kumparan penahan pada kedua sisinya dapat dilihat pada gambar 2.16 [3]. Kumparan penahan (*restraint coil*) berfungsi untuk menahan rele agar tidak bekerja (tetap stabil) ketika terdapat arus gangguan eksternal yang besar. Hal ini disebabkan oleh semakin besar arus gangguan yang melewati rele maka kopel yang dihasilkan oleh kumparan penahan juga semakin besar sehingga mencegah terjadinya kesalahan rele karena adanya arus yang mengalir melalui *restraining coil* akibat kejenuhan CT [10]. Apabila terjadi gangguan internal, arus-arus yang mengalir melalui kumparan penahan

akan saling memperlemah (berlawanan arah satu dengan lainnya) sehingga kopel yang dihasilkan akan sangat kecil.

Persamaan kopel pada rele *low impedance differential* sebagai berikut :

- Kopel operasi pada *operating coil* :

$$T_o = (i_1 - i_2) N_o \quad (2.14)$$

- Kopel lawan pada *restraining coil* :

$$T_{r1} = \frac{N_r}{2} i_1 \quad (2.15)$$

$$T_{r2} = \frac{N_r}{2} i_2 \quad (2.16)$$

Berdasarkan persamaan 2.15 dan 2.16 diperoleh torsi *restraining coil* sebagai berikut :

$$T_r = T_{r1} + T_{r2} \quad (2.17)$$

$$T_r = \frac{N_r}{2} i_1 + \frac{N_r}{2} i_2 \quad (2.18)$$

$$T_r = \frac{N_r}{2} (i_1 + i_2) \quad (2.19)$$

Dalam hal ini :

i_1, i_2 : arus sekunder pada CT_1 dan CT_2

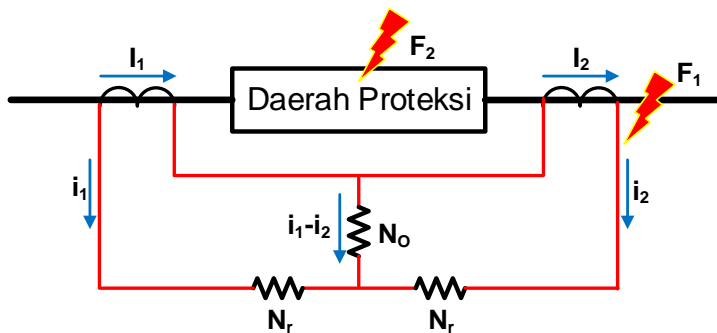
N_o, N_r : Jumlah lilitan *operating coil* dan *restraining coil*

Rele diferensial akan bekerja (mengirim sinyal *trip*) apabila memenuhi syarat sebagai berikut :

$$T_o > T_r \quad (2.20)$$

Karakteristik operasi rele *low impedance differential* berupa garis lurus dari *slope*. Secara umum *setting slope low impedance differential relay* dapat dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$Slope (\%) = \frac{i_1 - i_2}{\left(\frac{i_1 + i_2}{2}\right)} \times 100\% \quad (2.21)$$



Gambar 2.16 Skema rele diferensial dengan *restraining coil*

Dengan mengasumsikan bahwa CT_1 dan CT_2 merupakan dua transformator arus dengan perbandingan transformasi dan kapasitas yang sesuai, maka pengaruh nilai kopel terhadap kerja rele diferensial sebagai berikut :

- Kondisi normal

Arus I_1 dan I_2 ditransformasikan oleh CT_1 dan CT_2 menjadi i_1 dan i_2 . Berdasarkan persamaan 2.14 dan 2.19 maka pada kondisi normal $i_1=i_2$ sehingga diperoleh nilai kopel operasi pada *operating coil* sama dengan nol sedangkan kopel lawan pada *restraining coil* bernilai. Berdasarkan persamaan 2.20 dapat diketahui bahwa kopel operasi pada *operating coil* dan kopel lawan pada *restraining coil* tidak memenuhi $T_o > T_r$ sehingga tidak menyebabkan *operating coil* pada rele mengirimkan sinyal *trip*.

- Kondisi gangguan eksternal di F_1

Arus I_1 dan I_2 ditransformasikan oleh CT_1 dan CT_2 menghasilkan arus i_1 dan i_2 . Berdasarkan persamaan 2.14 dan 2.19 maka pada kondisi gangguan eksternal di F_1 $i_1=i_2$ sehingga diperoleh nilai kopel operasi pada *operating coil* sama dengan nol sedangkan kopel lawan pada *restraining coil* bernilai. Berdasarkan persamaan 2.20 dapat diketahui bahwa kopel operasi pada *operating coil* dan kopel lawan pada *restraining coil* tetap tidak memenuhi $T_o > T_r$ sehingga tidak menyebabkan *operating coil* pada rele mengirimkan sinyal *trip*.

- Kondisi gangguan internal di F_2

Arus I_1 dan I_2 ditransformasikan oleh CT_1 dan CT_2 . menghasilkan arus i_1 dan i_2 . Ketika gangguan internal di F_2 maka arus akan mengalir ke titik yang mengalami gangguan. Sehingga arah arus i_2 akan berlawanan arah. Berdasarkan persamaan 2.14 dan 2.19 maka pada kondisi gangguan internal di F_2 i_1+i_2 sehingga diperoleh nilai kopel operasi pada *operating coil* bernilai sangat besar sedangkan kopel lawan pada *restraining coil* bernilai sangat kecil, sehingga memenuhi kriteria rele diferensial bekerja sesuai persamaan 2.20. Oleh karena itu ketika gangguan internal di F_2 akan menyebabkan *operating coil* pada rele mengirimkan sinyal *trip*.

Waktu kerja rele diferensial sangat cepat yaitu pada $1/2 - 4 \text{ cycle}$. *Setting* pada rele diferensial harus mempertimbangkan besar arus gangguan yang ada di sekitar daerah pengamanan. Besar arus gangguan tersebut adalah arus gangguan minimum (*line-to-line*).

Pada rangkaian diferensial, saat kondisi normal arus yang mengalir pada setiap CT disebut arus *restraint* (I_R) sedangkan perbedaan arus yang menyebabkan rele diferensial bekerja disebut I_{diff} atau I_{OP} . Perbandingan antara I_R dan I_{diff} disebut *slope* (%). Nilai arus *restraint* berbanding lurus dengan arus diferensial sehingga rele diferensial akan bekerja apabila terjadi peningkatan nilai I_R dan I_{diff} secara proporsional [6]. Rele diferensial bekerja ketika I_{diff} dan I_R melebihi ambang minimum dari *setting slope* yang telah ditentukan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.17 [9]. Gambar 2.17 menunjukkan karakteristik kerja *percentage current differential* sebagai berikut :

a. Kondisi normal

Pada gambar 2.17 menunjukkan ketika kondisi normal I_{OP} sama dengan nol dan I_R berbanding lurus dengan arus beban normal yang mengalir pada bus. Pada kondisi normal titik operasi rele berada pada *restraint region*.

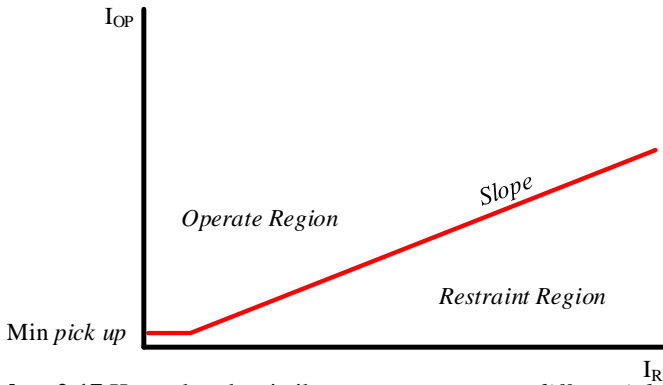
b. Kondisi gangguan internal

Pada gambar 2.17 menunjukkan ketika terjadi gangguan di dalam daerah yang diamankan maka akan terjadi peningkatan secara proporsional nilai I_{OP} dan I_R . Hal ini menyebabkan titik operasi rele berada pada *operate region*. Perubahan posisi titik

operasi rele menyebabkan rele 87B mengirimkan sinyal trip ke *circuit breaker*. Saat terjadi gangguan internal, seluruh arus pada *incoming* dan *outgoing* bus mengalir menuju titik gangguan.

c. Kondisi gangguan eksternal

Saat terjadi gangguan diluar bus yang diamankan, rele diferensial harus stabil sehingga tidak mengirimkan sinyal trip ke *circuit breaker*.



Gambar 2.17 Kurva karakteristik *percentage current differential*

Parameter setting rele diferensial *low impedance* untuk mendapatkan selektivitas kerja rele yang lebih tinggi, yaitu setting I_{diff} dan slope. I_{diff} merupakan selisih antara arus yang dirasakan oleh $CT_{incoming}$ dengan $CT_{outgoing}$, sedangkan slope adalah perbandingan antara I_{diff} dengan $I_{restraint}$. Apabila kedua fungsi ini dijalankan dengan logika AND, maka rele diferensial hanya akan bekerja saat setting I_{diff} dan setting slope terlewati (*pickup*). Menurut IEEE Std C.37.234 parameter *setting* kerja rele diferensial dapat dilihat pada persamaan berikut ini :

$$I_{OP} = I_{DIFF} = |I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n| \quad (2.22)$$

$$I_R = f(|I_1|, |I_2|, |I_3|, \dots, |I_n|) \quad (2.23)$$

Terdapat beberapa fungsi persamaan untuk menentukan arus *restraint* antara lain :

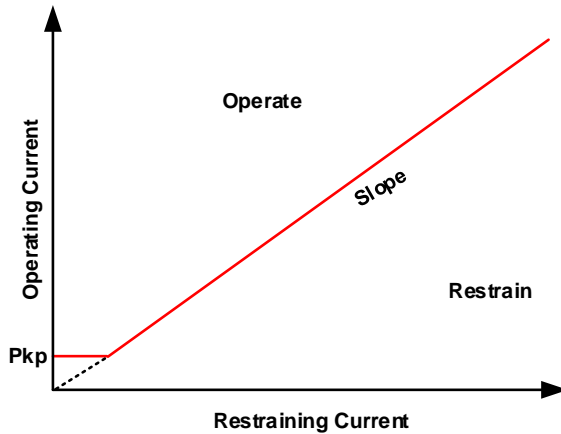
$$I_R = \frac{1}{n} (|I_1| + |I_2| + |I_3| + \dots + |I_n|) \quad (2.24)$$

$$I_R = \max(|I_1|, |I_2|, |I_3|, \dots, |I_n|) \quad (2.25)$$

$$I_R = \frac{1}{2} (|I_1| + |I_2| + |I_3| + \dots + |I_n|) \quad (2.26)$$

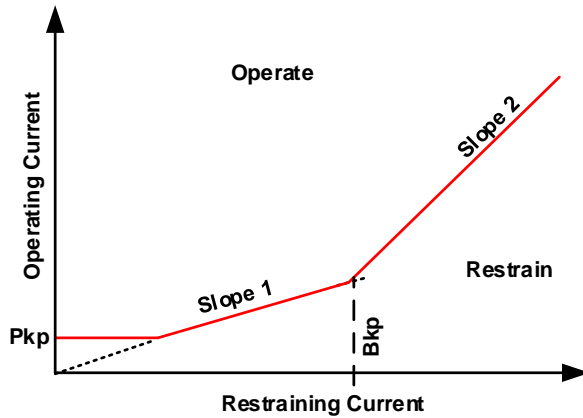
$$I_R = (|I_1| + |I_2| + |I_3| + \dots + |I_n|) \quad (2.27)$$

Setting arus restrain (I_R) untuk setiap manufaktur rele diferensial tidaklah sama. *Setting slope* yang sama akan menghasilkan sensitivitas kerja rele diferensial yang berbeda apabila fungsi untuk menentukan I_R nya berbeda. Oleh karena itu, perlu diperhatikan pemilihan persamaan I_R sebelum melakukan *setting* rele diferensial [11]. Pada umumnya setiap karakteristik terdiri dari *pickup setting* (Pkp) dan setidaknya terdapat satu slope seperti yang terlihat pada gambar 2.18.



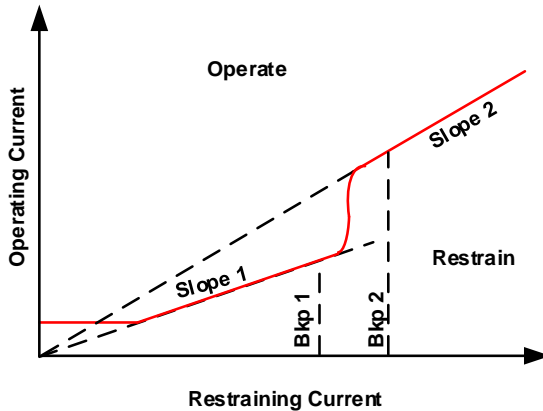
Gambar 2.18 Karakteristik *percentage differential* dengan 1 slope

Namun karakteristik operasi *percentage differential* dengan dua slope dengan slope yang kedua disetting lebih besar untuk mengantisipasi *error* CT untuk arus yang bernilai lebih besar. Karakteristik dual slope dilengkapi dengan nilai *breakpoint* (Bkp) untuk memisahkan slope rendah dengan slope yang lebih tinggi seperti yang terlihat pada gambar 2.19.



Gambar 2.19 Karakteristik *percentage differential* dual slope – 1 Bkp

Terkadang karakteristik *percentage differential* dilengkapi dua breakpoint (Bkp) seperti yang terlihat pada gambar 2.20.



Gambar 2.20 Karakteristik *percentage differential* dual slope – 2 Bkp

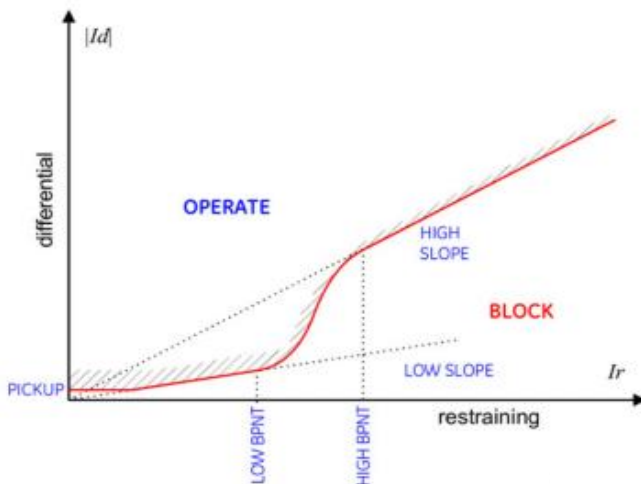
2.6 GE Multilin B30 Bus Differential System

Rekomendasi setting rele diferensial pada bus 18 kV menggunakan manufaktur rele dari *GE Multilin B30 Bus Differential System*. *B30 Bus Differential System* merupakan rele berbasis mikrosesesor yang digunakan untuk keperluan proteksi busbar hingga 6 buah feeder. Elemen diferensial

bias menggunakan karakteristik *dual slope* dengan *dual breakpoint* [12]. Arus restraint terbentuk melalui maksimum arus yang mengalir menuju rele. Rele bekerja ketika terjadi gangguan internal namun harus stabil ketika terjadi gangguan eksternal. Parameter yang diperlukan untuk *setting* rele diferensial bus menggunakan *GE Multilin B30 Bus Differential System* antara lain :

- *DIF PICKUP* range 0,05 – 6 pu in steps of 0,001
- *DIF LOW SLOPE* range 15 - 100% in steps of 1
- *DIF LOW BREAKPOINT* range 1-30 pu in steps of 0,01
- *DIF HIGH SLOPE* range 50-100% in steps of 1
- *DIF HIGH BREAKPOINT* range 1-30 pu in steps of 0,01

Karakteristik kerja rele diferensial bus bias (*restrained*) dengan *dual slope* dapat dilihat pada gambar 2.21



Gambar 2.21 Karakteristik diferensial bias *GE Multilin B30*

Berdasarkan kurva karakteristik operasi diferensial bias dapat diketahui bahwa daerah di atas garis slope merupakan daerah kerja rele ketika terjadi gangguan internal sedangkan daerah di bawah garis slope merupakan daerah rele tidak bekerja pada kondisi normal maupun ketika terjadi gangguan eksternal.

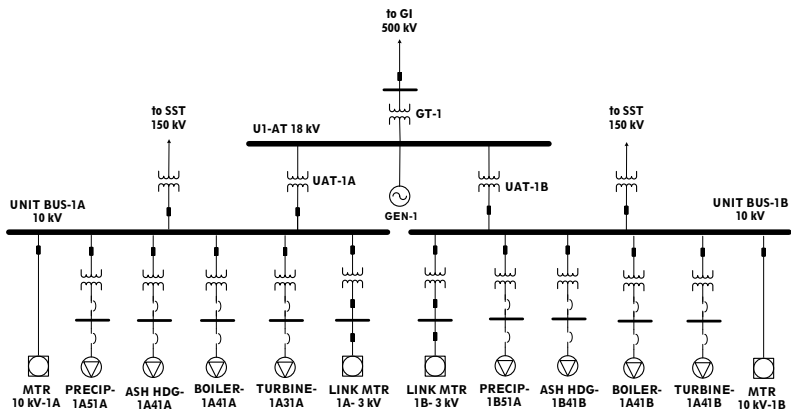
- ***DIF PICKUP***
Dif Pickup Merupakan nilai arus diferensial minimum dimana elemen proteksi diferensial bus diperbolehkan bekerja. *Dif pickup* diperlukan untuk mencegah terjadinya kekeliruan rele bekerja akibat arus restraint yang kecil untuk mencapai karakteristik *low slope*. Sehingga *dif pickup* memberikan sensitivitas untuk nilai arus gangguan yang kecil.
- ***DIF LOW SLOPE***
Setting low slope ditentukan untuk arus restrain dari nol hingga *low breakpoint*. *Setting* ini menentukan sensitivitas rele untuk arus hubungan singkat yang bernilai kecil di daerah internal. Nilai *setting low slope* yang dipilih harus dapat mengatasi arus diferensial palsu akibat ketidaktelitian operasi CT pada mode linier baik pada kondisi normal.
- ***DIF LOW BREAKPOINT***
Setting Dif Low Breakpoint mempertimbangkan arus yang mengalir ketika peralatan dioperasikan maksimum.
- ***DIF HIGH SLOPE***
Setting high slope ditentukan untuk arus restraint lebih dari *low breakpoint*. Efek dari mengatur *high slope* pada proteksi diferensial bias adalah rele akan tetap stabil untuk arus hubungan singkat yang bernilai cukup besar di daerah eksternal. Nilai *setting high slope* yang dipilih harus dapat mengatasi arus diferensial palsu akibat saturasi CT selama gangguan eksternal.
- ***DIF HIGH BREAKPOINT***
Arus restraint yang melebihi *high breakpoint* digunakan untuk menentukan *setting high slope*.

BAB 3

SISTEM KELISTRIKAN PLTU UP PAITON UNIT 1

3.1 Sistem Kelistrikan PLTU UP Paiton Unit 1

Untuk memenuhi suplai daya ke beban – bebannya pada unit 1, PLTU Paiton menggunakan 1 generator dengan kapasitas 402, 05 W. Sistem yang digunakan adalah sistem radial dengan tiga level tegangan, yaitu 10 kV dan 18 kV untuk tegangan menengah serta 0,4 kV untuk tegangan rendah. Secara umum sistem kelistrikan pada PLTU UP Paiton Unit 1 dapat dilihat pada gambar 3.1 dibawah ini.



Gambar 3.1 Single line diagram PLTU UP Paiton Unit 1

3.2 Kapasitas Pembangkitan

PLTU UP Paiton Unit 1 memiliki 1 generator sebagai pembangkit utama untuk memenuhi suplai daya ke beban–bebannya. Data pembangkitan dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Data kapasitas pembangkit PLTU UP Paiton Unit 1

No.	ID	MW	MVA	kV	PF
1	GEN-1	402,05	473	18	85

3.3 Sistem Distribusi di PLTU UP Paiton Unit 1

Sistem distribusi di PLTU UP Paiton Unit 1 menggunakan sistem distribusi radial dengan utama sebesar 18 kV. Selain itu, PLTU UP Paiton Unit 1 juga memiliki bus dengan level tegangan 500 kV yang terhubung dengan grid serta 10 kV dan 0,4 kV yang terhubung langsung ke beban motor atau *lumped load*. Data level tegangan bus pada PLTU UP Paiton Unit 1 dapat dilihat pada tabel 3.2 dibawah ini.

Tabel 3.2 Data level tegangan bus di PLTU UP Paiton Unit 1

No.	ID	Tegangan (kV)
1	BUS LINK	500
2	U1-AT	18
3	UNIT BUS-1A	10
4	UNIT BUS-1B	10
5	LINK MTR 1 A	3
6	LINK MTR 1 B	3
7	PRECIP-1A51A	0,4
8	PRECIP-1B51A	0,4
9	ASH HDG-1A41A	0,4
10	ASH HDG-1B41B	0,4
11	BOILER-1A41A	0,4
12	BOILER-1B41A	0,4
13	TURBINE-1A31A	0,4
14	TURBINE-1B31A	0,4

Pada kondisi normal, PLTU Paiton Unit 1 memiliki total pembangkitan, pembebanan, dan rugi – rugi yang dirangkum sebagai berikut:

Tabel 3.3 Data Rangkuman Pembangkitan dan Pembebanan PLTU Paiton Paiton Unit 1

	MW	MVAR
Generation	118,433	65,564
Load	118,433	65,564
Loss	0,667	12,782

Beban – beban di PLTU UP Paiton Unit 1 dibedakan menjadi tiga yaitu beban besar yang dihubungkan pada bus level tegangan 10 kV, beban menengah yang dihubungkan pada bus level tegangan 3 kV, dan beban kecil yang dihubungkan pada bus level tegangan 0,4 kV. Untuk mengubah level tegangan dari 18 kV ke 10 kV, 10 kV ke 3 kV, dan 10 kV ke 0,4 kV PLTU UP Paiton Unit 1 memiliki 12 transformator daya dengan rating dijelaskan pada tabel berikut :

Tabel 3.4 Data transformator sistem distribusi PLTU UP Paiton Unit 1

N o	ID	Kapasitas (kVA)	Tegangan (kV)	%Z	Hubungan
1	UAT-1A	20000	18/10	4,5	Delta-Wye
2	UAT-1B	20000	18/10	4,5	Delta-Wye
3	AT-1A	10000	10/3	4	Delta-Wye
4	AT-1B	10000	10/3	4	Delta-Wye
5	TRF-PRECIP 1A51A	2000	3/0,4	5,75	Delta-Wye
6	TRF-PRECIP 1B51A	2000	3/0,4	5,75	Delta-Wye
7	TRF-ASH HDG 1A41A	1300	3/0,4	4	Delta-Wye
8	TRF-ASH HDG 1A41B	1300	3/0,4	4	Delta-Wye
9	TRF-BOILER 1A41A	2000	3/0,4	5,75	Delta-Wye
10	TRF-BOILER 1B41A	2000	3/0,4	5,75	Delta-Wye
11	TRF- TURBINE 1A31A	2000	3/0,4	5,75	Delta-Wye
12	TRF- TURBINE 1B31A	2000	3/0,4	5,75	Delta-Wye

3.4 Data Beban di PLTU UP Paiton Unit 1

Beban yang terdapat pada di PLTU UP Paiton Unit 1 merupakan beban motor induksi dan *lumped load*. Data beban motor induksi di PLTU UP Paiton Unit 1 dapat dilihat pada tabel 3.5. Sedangkan data beban *lumped load* di PLTU UP Paiton Unit 1 dapat dilihat pada tabel 3.6.

Tabel 3.5 Data beban motor induksi di PLTU UP Paiton Unit 1

No	ID	Kapasitas (MW)	Kapasitas (MVA)	Tegangan (kV)	FLA (A)
1	ID Fan A	2,611	2,983	10	172,2
2	ID FAN B	2,611	2,983	10	172,2
3	CWP A	1,4	1,609	10	92,92
4	CWP B	1,4	1,609	10	92,92
5	CWP C	1,4	1,609	10	92,92
6	BFP A	7,1	8,032	10	463,7
7	BFP B	7,1	8,162	10	471,2
8	BFWP C	7,1	8,111	10	468,3
9	FD FAN A	1,450	1,667	10	96,22
10	FD FAN B	1,450	1,667	10	96,22
11	PA FAN A	1,230	1,416	3	272,5
12	PA FAN B	1,230	1,416	3	272,5
13	CEP A	0,630	0,730	3	140,5
14	CEP B	0,630	0,730	3	140,5
15	CEP C	0,630	0,730	3	140,5
16	MILL A	0,448	0,521	3	100,2
17	MILL B	0,448	0,521	3	100,2
18	MILL C	0,448	0,521	3	100,2
19	MILL D	0,448	0,521	3	100,2
20	MILL E	0,448	0,521	3	100,2
21	SAC A	0,367	0,428	3	82,29
22	SAC B	0,367	0,428	3	82,29
23	SAC C	0,400	0,466	3	89,61

Tabel 3.6 Data beban motor induksi di PLTU UP Paiton Unit 1(*lanjutan*)

N o	ID	Kapasitas (MW)	Kapasitas (MVA)	Tegangan (kV)	FLA (A)
24	AOP	0,2	0,234	3	45,12
25	BWCP A	0,261	0,305	3	58,72
26	BWCP C	0,261	0,305	3	58,72
27	CCWP A	0,260	0,304	3	58,51
28	CCWP B	0,260	0,304	3	58,51
29	SW Fire Pump	0,336	0,392	3	75,41
30	HIGH HEAD A	0,261	0,305	3	58,72
31	HIGH HEAD B	0,261	0,305	3	58,72
32	Conveyor K2	0,450	0,523	3	100,7

Tabel 3.7 Data beban *lumped load* di PLTU UP Paiton Unit 1

N o	ID	Kapasitas (MW)	Kapasitas (MVA)	Tegangan (kV)	FLA (A)
1	PRECIP-1A51A	1,7	2	0,4	2887
2	PRECIP-1B51A	1,7	2	0,4	2887
3	ASH HDG- 1A41B	1,105	1,3	0,4	1876
4	ASH HSG- 1B41B	1,105	1,3	0,4	1876
5	BOILER- 1A41A	1,7	2	0,4	2887
6	BOILER- 1A41B	1,7	2	0,4	2887
7	TURBINE- 1A31A	1,7	2	0,4	2887
8	TURBINE- 1A41A	1,7	2	0,4	2887

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL SIMULASI DAN EVALUASI KEGAGALAN SETTING RELE DIFERENSIAL PADA BUS 18 kV DI SISTEM KELISTRIKAN PLTU UP PAITON UNIT 1

4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan PLTU UP Paiton Unit 1

Dalam memodelkan sistem kelistrikan PLTU UP Paiton Unit 1 dilakukan dengan cara menggambarkan *single line diagram* menggunakan *software* ETAP 12.6.0. Pemodelan simulasi sistem kelistrikan ini memerlukan data – data pada tiap peralatan seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya.

Setelah dilakukan pemodelan pada *software* ETAP 12.6.0 selanjutnya dilakukan simulasi aliran daya untuk memastikan apakah sistem dalam keadaan stabil dan berjalan dengan baik. Dengan analisa aliran daya ini bisa diketahui tegangan pada bus, pembebanan pada tiap transformator, dan juga rugi – rugi daya listrik. Selanjutnya dilakukan simulasi hubung singkat untuk mengetahui besar arus hubung singkat ketika terjadi gangguan sebagai pertimbangan untuk melakukan penyetelan proteksi. Sehingga *setting* proteksi yang dilakukan tepat dan handal.

4.2 Analisis Arus Gangguan Hubung Singkat

Analisis arus gangguan hubung singkat pada *software* ETAP 12.6.0 berfungsi untuk mendapatkan nilai arus saat terjadi gangguan sebagai pertimbangan ketika melakukan *setting* rele pada proteksi. Waktu kerja rele diferensial sangat cepat yaitu $\frac{1}{2}$ - 4 *cycle*. *Setting* rele diferensial ditentukan berdasarkan nilai I_{diff} dan slope yang terbesar saat kondisi normal atau ketika terjadi gangguan hubung singkat di luar daerah pengamanan. Oleh karena itu, nilai arus hubung singkat yang diperlukan untuk *setting* rele diferensial bus adalah arus hubung singkat saat $\frac{1}{2}$ *cycle*. Baik hubung singkat antar fasa (L-L), tiga fasa (L-L-L), maupun satu fasa ke tanah (L-G).

Hubung singkat $\frac{1}{2}$ *cycle* digunakan untuk mengetahui besar arus pada daerah internal apakah telah melebihi nilai arus operasi minimum dari rele diferensial. Simulasi hubung singkat dilakukan pada bus yang mewakili saat terjadi gangguan di dalam area yang diamankan (gangguan internal) dan gangguan di luar area yang diamankan (gangguan eksternal). Analisis hubung singkat dapat dilihat pada tabel 4.1 di bawah ini :

Tipe relay : ABB HU-1
 Logika relay : $I_1 = I_3 - (I_2 + I_4)$
 Sensitivitas : 35% (mismatch)

Bagian Primer Rele Diferensial 87B

CT-1

Tegangan = 525 kV
 Kapasitas = 473 MVA
 Rasio CT = 600/5
 Tap Rele = 8,7 A
 CT Class = 5P20

$$I_1 (\text{Primer CT}) = \frac{MVA \text{ peralatan}}{\sqrt{3} \text{ kV}} = \frac{473 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 525} = 520,2 \text{ A}$$

$$I_1 (\text{Sekunder CT}) = \frac{520,1650997}{600/5} = 4,335 \text{ A} \quad (I_1 = I_p)$$

Bagian Sekunder Rele Diferensial 87B

CT-2

Tegangan = 18 kV
 Kapasitas = 20 MVA
 Rasio CT = 3600/1
 Tap Rele = 5 A
 CT Class = 5P20

$$I_2 (\text{Primer CT}) = \frac{MVA \text{ peralatan}}{\sqrt{3} \text{ kV}} = \frac{20 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 18} = 641,5 \text{ A}$$

$$I_2 (\text{Sekunder CT}) = \frac{641,5}{3600/1} = 0,1782 \text{ A} \quad (I_2)$$

CT-3

Tegangan = 18 kV
 Kapasitas = 470 MVA
 Rasio CT = 18000/5
 Tap Rele = 5 A
 CT Class = 5P20

$$I_3 (\text{Primer CT}) = \frac{MVA \text{ peralatan}}{\sqrt{3} \text{ kV}} = \frac{470 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 18} = 15.075,3 \text{ A}$$

$$I_3 (\text{Sekunder CT}) = \frac{15.075,25703}{18000/5} = 4,1876 \text{ A} \quad (I_3)$$

CT-4

Tegangan = 18 kV

Kapasitas = 20 MVA

Rasio CT = 3600/1

Tap Rele = 5 A

CT Class = 5P20

$$I_4 (\text{Primer CT}) = \frac{MVA \text{ peralatan}}{\sqrt{3} \text{ kV}} = \frac{20 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 18} = 641,5 \text{ A}$$

$$I_4 (\text{Sekunder CT}) = \frac{641,5}{3600/1} = 0,1782 \text{ A} \quad (I_4)$$

$$\text{Arus sekunder rele 87 B} = I_3 - (I_2 + I_4) = 3,831 \text{ A} \quad (I_s)$$

Analisis Eksisting Kondisi Normal

$$\begin{aligned} \frac{I_p}{I_s} &= \frac{I_1}{I_3 - (I_2 + I_4)} \\ &= \frac{\frac{520,2}{600/5}}{\frac{15.075,3}{18000/5} - \left(\frac{641,5}{3600/1} + \frac{641,5}{3600/1} \right)} \\ &= \frac{4,335}{4,188 - (0,178 + 0,178)} \\ &= \frac{4,335}{3,831} \\ &= 1,1314, I_p > I_s \quad (4.1) \end{aligned}$$

$$\text{Tap rele} = \frac{I_p}{I_s} = \frac{8,7}{5} = 1,74, I_p > I_s \quad (4.2)$$

Berdasarkan persamaan 4.2, dapat diketahui *range mismatch* yang diperbolehkan sebagai berikut :

$$\begin{array}{llll} I_p = 8,7 \text{ A} & \text{Batas atas} & = & 8,7 + (8,7 \cdot 35\%) = 11,745 \text{ A} \\ & \text{Batas bawah} & = & 8,7 - (8,7 \cdot 35\%) = 5,655 \text{ A} \\ I_s = 5 \text{ A} & \text{Batas atas} & = & 5 + (5 \cdot 35\%) = 6,75 \text{ A} \\ & \text{Batas bawah} & = & 5 - (5 \cdot 35\%) = 3,25 \text{ A} \end{array}$$

Berdasarkan hasil perbandingan I_p/I_s pada 4.1 apabila I_p yang mengalir pada bagian primer rele sebesar 8,7 A, maka I_s pada sekunder rele sebesar 7,743 A (pada kondisi normal, tidak memenuhi *range mismatch* yang diperbolehkan). Dengan perbandingan tersebut, maka pilihan tap rele yang mendekati adalah 3,5 A untuk rele dibagian sekunder (CT-2, CT-3, dan CT-4) serta 3,8 A untuk rele dibagian primer (CT-1) dengan analisa sebagai berikut :

$$\text{Tap rele} = \frac{I_p}{I_s} = \frac{3,8}{3,5} = 1,086, I_p > I_s \quad (4.3)$$

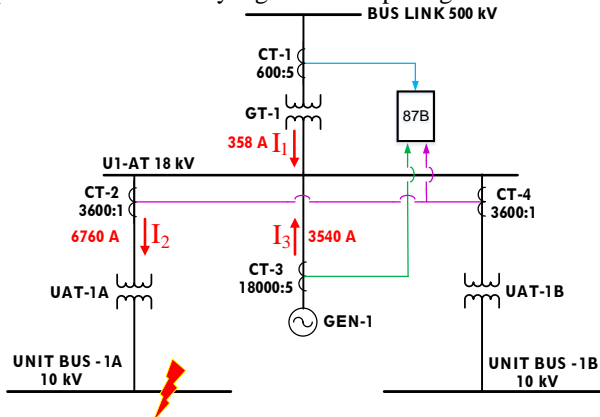
Berdasarkan persamaan 4.3, dapat diketahui *range mismatch* yang masih diperbolehkan sebagai berikut :

Ip = 3,8 A	Batas atas	=	$3,8 + (3,8 \cdot 35\%)$	=	5,13 A
	Batas bawah	=	$3,8 - (3,8 \cdot 35\%)$	=	2,47 A
Is = 3,5 A	Batas atas	=	$3,5 + (3,5 \cdot 35\%)$	=	4,725 A
	Batas bawah	=	$3,5 - (3,5 \cdot 35\%)$	=	2,275 A

Apabila Ip yang mengalir pada bagian primer rele sebesar 3,8 A, maka sesuai persamaan 4.1 Is pada sekunder rele sebesar 3,38 A (pada kondisi normal, memenuhi *range mistmach* yang diperbolehkan). Dari analisis ini, terdapat perbedaan dengan tap rele pada kondisi eksisting.

Analisis Eksisting Kondisi Gangguan Eksternal

Ketika terjadi gangguan hubung singkat L-L pada beban motor BFP A 10 kV (7100 kW) yang disulang dari transformator UAT-1A, maka terjadi perubahan nilai arus yang dianalisis pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 Pemodelan 87B saat gangguan di BFP A 10kV

$$\begin{aligned}
 \frac{I_p}{I_s} &= \frac{I_1}{I_3 - (I_2 + I_4)} \\
 &= \frac{-\frac{358}{600/5}}{\frac{3540}{18000/5} - \left(\frac{6760}{3600/1} - \frac{0}{3600/1}\right)} \\
 &= \frac{-2,9833}{0,9833 - (1,877 - 0)} \\
 &= \frac{-2,9833}{-0,8944} \\
 &= 3,335, I_p > I_s \quad (4.4)
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perbandingan I_p/I_s pada 4.4, apabila I_p yang mengalir pada bagian primer rele sebesar 3,8 A, maka I_s pada sekunder rele sebesar 1,1392 A. Pada kondisi gangguan eksternal, tidak memenuhi *range mismatch* yang diperbolehkan sehingga menyebabkan rele diferensial bekerja. Atau dengan kata lain karena terdapat perbedaan kondisi eksisting antara kondisi normal dan gangguan mencapai 294 77% yang lebih besar dari *mismatch* relay (35%), maka rele diferensial 87B akan mengirimkan sinyal trip pada *circuit breaker* ketika terjadi gangguan eksternal. Berdasarkan perhitungan diatas, maka dapat disimpulkan bahwa terdapat kekeliruan dalam perhitungan *setting* rele diferensial bus 18 kV.

4.5 Rekomendasi *Setting* Rele Diferensial Bus

Setting pada rele diferensial dapat dilakukan dengan cara perhitungan manual. Parameter yang dihitung antara lain arus yang terbaca pada sekunder CT, selisih arus pada sekunder CT, rata – rata arus yang terbaca pada sekunder CT dan yang terakhir adalah slope. Logika dasar rele diferensial bus adalah arus yang masuk pada bus sama dengan arus yang keluar pada bus. Parameter *setting* harus memperhatikan arus diferensial yang melalui rele 87B dan slope saat kondisi normal dan gangguan hubung singkat diluar daerah pengamanan.

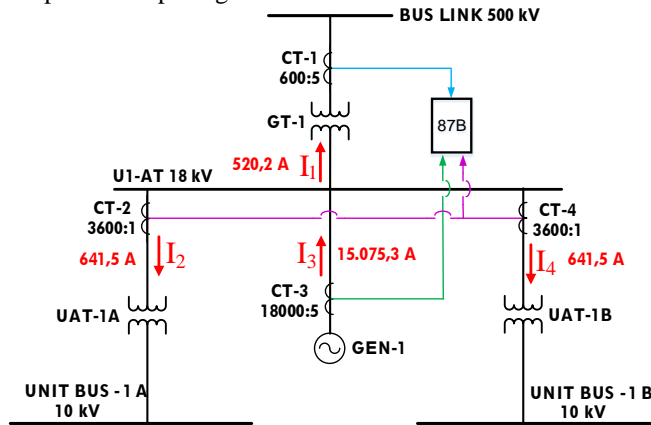
Spesifikasi rele 87B yang digunakan :

Manufacturer : GE Multilin B30 Bus Differential System

$I_{diff\ pickup}$: 0,05– 6pu in steps of 0,001
Low slope range	: 15% - 100% in steps of 1
Low breakpoint range	: 1-30 pu in steps of 0,01
High slope range	: 50-100% in steps of 1
High breakpoint range	: 1-30 pu in steps of 0,01

Kondisi Normal

Pada kondisi normal, arus disuplai oleh GEN-1 mengalir melalui transformator UAT-1A, UAT-1B, atau GT-1 menuju beban berupa motor induksi dan beban *lumped load*. Pemodelan rele diferensial pada kondisi normal dapat dilihat pada gambar 4.3.



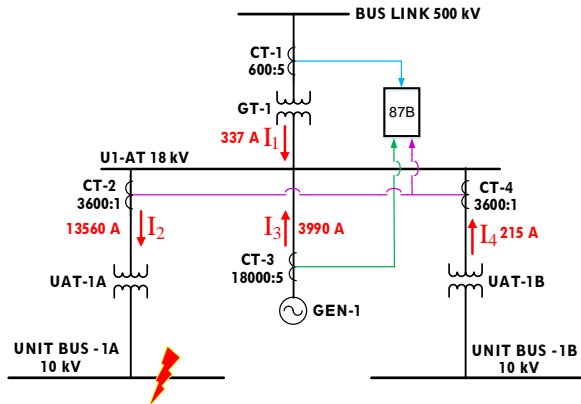
Gambar 4.3 Pemodelan 87B saat kondisi normal

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_3 - (I_2 + I_4) \\
 \frac{520,2}{600/5} &= \frac{15.075,3}{18000/5} - \left(\frac{641,5}{3600/1} + \frac{641,5}{3600/1} \right) \\
 4,335 &= 4,1876 - (0,178 + 0,178) \\
 4,335 &\neq 3,831 \\
 I_{Restrained} &= \max(|I_p|, |I_s|) \\
 &= \max(|4,335|, |3,8312|)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 4,335 \text{ A} \\
 I_{diff} &= |I_p - I_s| \\
 &= |4,335 - 3,831| \\
 &= \mathbf{0,504 \text{ A}} \\
 I_{diff} (\%) &= \frac{0,504}{5} \times 100\% \\
 &= \mathbf{10,07 \%} \\
 Slope (\%) &= \frac{I_{diff}}{I_{restrain}} \times 100\% \\
 &= \frac{0,504}{4,335} \times 100\% \\
 &= \mathbf{11,62\%}
 \end{aligned}$$

Gangguan Eksternal L-L di UNIT BUS 1A-10 kV

Ketika terjadi hubung singkat L-L di Unit Bus 1A-10 kV, maka seluruh arus akan menuju pada titik gangguan. Hal tersebut menyebabkan perubahan arah arus yang melalui feeder UAT-1B dan GT-1. Perubahan arah arus ditunjukkan dengan tanda negatif I_1 dan I_4 pada persamaan $I_1 = I_3 - (I_2 + I_4)$. Nilai arus hubung singkat L-L $\frac{1}{2}$ cycle pada UNIT BUS-1A 10 kV dan pemodelan rele diferensial ketika terjadi hubung singkat L-L di UNIT BUS 1A-10kV dapat dilihat pada gambar 4.4.



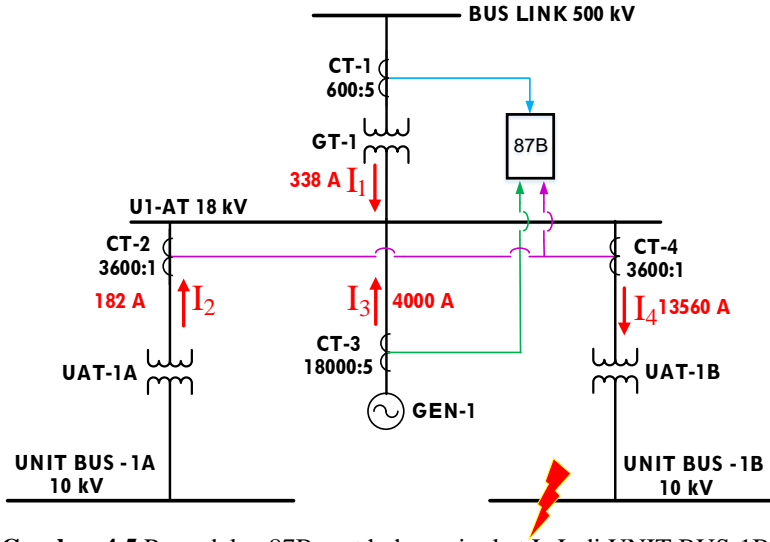
Gambar 4.4 Pemodelan 87B saat hubungsingkat L-L di UNIT BUS-1A

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_3 - (I_2 + I_4) \\
 -\frac{337}{600/5} &= \frac{3990}{18000/5} - \left(\frac{13560}{3600/1} - \frac{215}{3600/1} \right) \\
 -2,8083 &= 1,1083 - (3,7667 - 0,0597) \\
 -2,8083 &\neq -2,5986 \\
 I_{Restrained} &= \max(|I_p|, |I_s|) \\
 &= \max(|-2,8083|, |-2,5986|) \\
 &= 2,8083 \text{ A} \\
 I_{diff} &= |I_p - I_s| \\
 &= |-2,8083 + 2,5986| \\
 &= \mathbf{0,2097 \text{ A}} \\
 I_{diff} (\%) &= \frac{0,2097}{5} \times 100\% \\
 &= \mathbf{4,2 \%} \\
 Slope (\%) &= \frac{I_{diff}}{I_{Restrained}} \times 100\% \\
 &= \frac{0,2097}{2,5986} \times 100\% \\
 &= \mathbf{747\%}
 \end{aligned}$$

Gangguan Eksternal L-L di UNIT BUS 1B-10 kV

Ketika terjadi hubung singkat L-L di Unit Bus 1B-10 kV, maka seluruh arus akan menuju pada titik gangguan. Hal tersebut menyebabkan perubahan arah arus yang melalui feeder UAT-1A dan GT-1. Perubahan

arah arus ditunjukkan dengan tanda negatif I_1 dan I_2 pada persamaan $I_1 = I_3 - (I_2 + I_4)$. Nilai arus hubung singkat L-L $\frac{1}{2}$ cycle pada UNIT BUS-1B 10 kV dan pemodelan 87B ketika terjadi hubung singkat L-L di UNIT BUS 1B-10 kV dapat dilihat pada gambar 4.5.



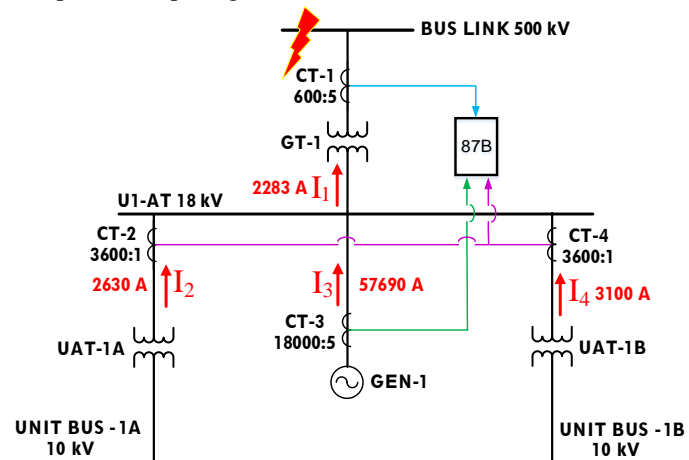
Gambar 4.5 Pemodelan 87B saat hubungsingkat L-L di UNIT BUS-1B

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_3 - (I_2 + I_4) \\
 -\frac{338}{600/5} &= \frac{4000}{18000/5} - \left(-\frac{182}{3600/1} + \frac{13560}{3600/1} \right) \\
 -2,817 &= 1,111 - (0,0505 + 3,7667) \\
 -2,817 &\neq -2,605 \\
 I_{\text{Restrained}} &= \max(|I_p|, |I_s|) \\
 &= \max(|-2,817|, |-2,605|) \\
 &= \mathbf{2,817 \text{ A}} \\
 I_{\text{diff}} &= |I_p - I_s|
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= |-2,817 + 2,605| \\
 &= 0,212 \text{ A} \\
 I_{diff} (\%) &= \frac{0,212}{5} \times 100\% \\
 &= 4,23 \% \\
 Slope (\%) &= \frac{I_{diff}}{I_{Restrained}} \times 100\% \\
 &= \frac{0,212}{2,817} \times 100\% \\
 &= 7,5 \%
 \end{aligned}$$

Gangguan Eksternal L-L di BUS LINK 500 kV

Ketika terjadi hubung singkat L-L di Bus A 500 kV, maka seluruh arus akan menuju pada titik gangguan. Hal tersebut menyebabkan perubahan arah arus yang melalui feeder UAT-1A dan UAT-1B. Perubahan arah arus ditunjukkan dengan tanda negatif I_2 dan I_4 pada persamaan $I_1 = I_3 - (I_2 + I_4)$. Nilai arus hubung singkat L-L $\frac{1}{2}$ cycle pada Bus A 500 kV dan pemodelan rele diferensial ketika terjadi hubung singkat L-L di BUS LINK 500kV dapat dilihat pada gambar 4.6.



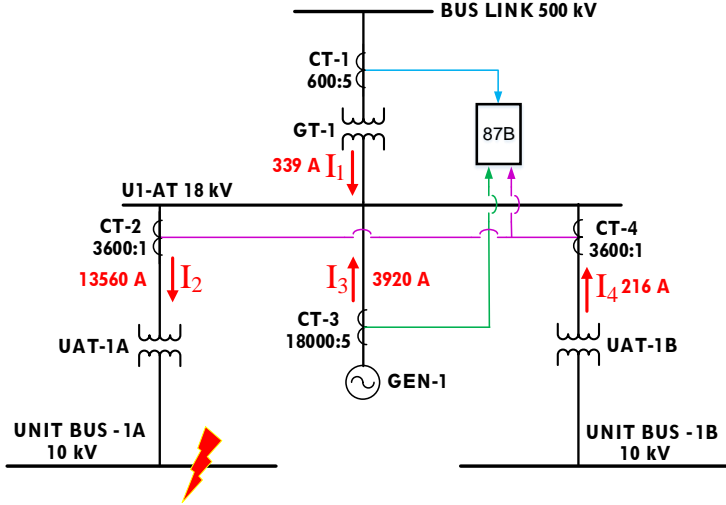
Gambar 4.6 Pemodelan 87B saat hubungsingkat L-L di BUS LINK

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_3 - (I_2 + I_4) \\
 \frac{2283}{600/5} &= \frac{57690}{18000/5} - \left(-\frac{2630}{3600/1} - \frac{3100}{3600/1} \right) \\
 19,025 &= 16,025 - (-0,731 - 0,861) \\
 19,025 &\neq 17,62 \\
 I_{Restrained} &= \max(|I_p|, |I_s|) \\
 &= \max(|19,025|, |17,62|) \\
 &= 19,025 \\
 I_{diff} &= |I_p - I_s| \\
 &= |19,025 - 17,62| \\
 &= \mathbf{1,408 \text{ A}} \\
 I_{diff} (\%) &= \frac{1,408}{5} \times 100\% \\
 &= \mathbf{28,2 \%} \\
 Slope (\%) &= \frac{I_{diff}}{I_{Restrained}} \times 100\% \\
 &= \frac{1,408}{19,025} \times 100\% \\
 &= \mathbf{7,40 \%}
 \end{aligned}$$

Gangguan Eksternal 3 Fasa di UNIT BUS 1A-10 kV

Ketika terjadi hubung singkat 3 phasa di Unit Bus 1A-10 kV, maka seluruh arus akan menuju pada titik gangguan. Hal tersebut menyebabkan perubahan arah arus yang melalui feeder UAT-1B dan GT-1. Perubahan arah arus ditunjukkan dengan tanda negatif I_1 dan I_4 pada persamaan $I_1 = I_3$

– $(I_2 + I_4)$. Nilai arus hubung singkat 3 fasa $\frac{1}{2}$ cycle pada UNIT BUS-1A 10 kV dan pemodelan rele diferensial ketika terjadi hubung singkat 3 fasa di UNIT BUS 1A-10kV dapat dilihat pada gambar 4.7.



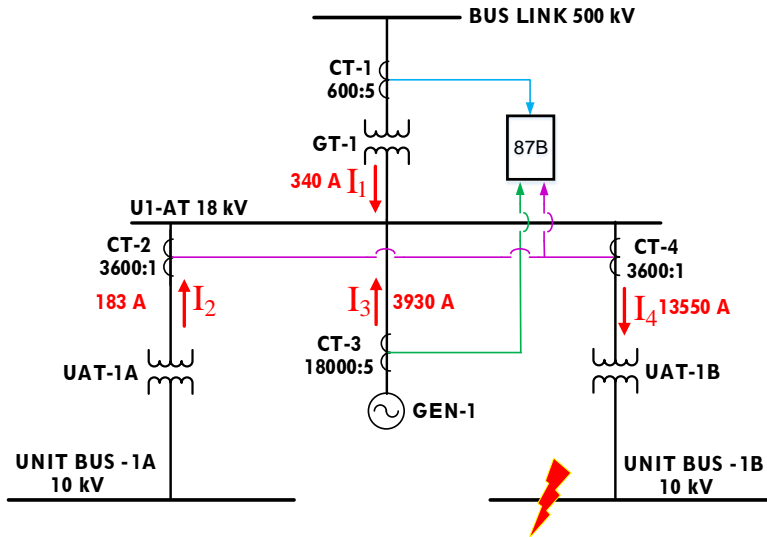
Gambar 4.7 Pemodelan 87B saat hubung singkat 3 fasa di UNIT BUS-1A

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_3 - (I_2 + I_4) \\
 -\frac{339}{600/5} &= \frac{3920}{18000/5} - \left(\frac{13560}{3600/1} - \frac{216}{3600/1} \right) \\
 -2,825 &= 1,1089 - (3,767 - 0,06) \\
 -2,825 &\neq -2,618 \\
 I_{Restrained} &= \max(|I_p|, |I_s|) \\
 &= \max(|-2,825|, |-2,618|) \\
 &= 2,825 \text{ A} \\
 I_{diff} &= |I_p - I_s| \\
 &= |-2,825 + 2,168|
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \mathbf{0,207\ A} \\
 I_{diff} (\%) &= \frac{0,207}{5} \times 100\% \\
 &= \mathbf{4,14\ \%} \\
 Slope (\%) &= \frac{I_{diff}}{I_{Restrained}} \times 100\% \\
 &= \frac{0,207}{2,5986} \times 100\% \\
 &= \mathbf{7,34\%}
 \end{aligned}$$

Gangguan Eksternal 3 Fasa di UNIT BUS 1B-10 kV

Ketika terjadi hubung singkat L-L-L di Unit Bus 1B-10 kV, maka seluruh arus akan menuju pada titik gangguan. Hal tersebut menyebabkan perubahan arah arus yang melalui feeder UAT-1A dan GT-1. Perubahan arah arus ditunjukkan dengan tanda negatif I_1 dan I_2 pada persamaan $I_1 = I_3 - (I_2 + I_4)$. Nilai arus hubung singkat 3 fasa $\frac{1}{2}$ cycle pada UNIT BUS-1B 10 kV dan pemodelan 87B ketika terjadi hubung singkat 3 fasa di UNIT BUS 1B-10 kV dapat dilihat pada gambar 4.8.



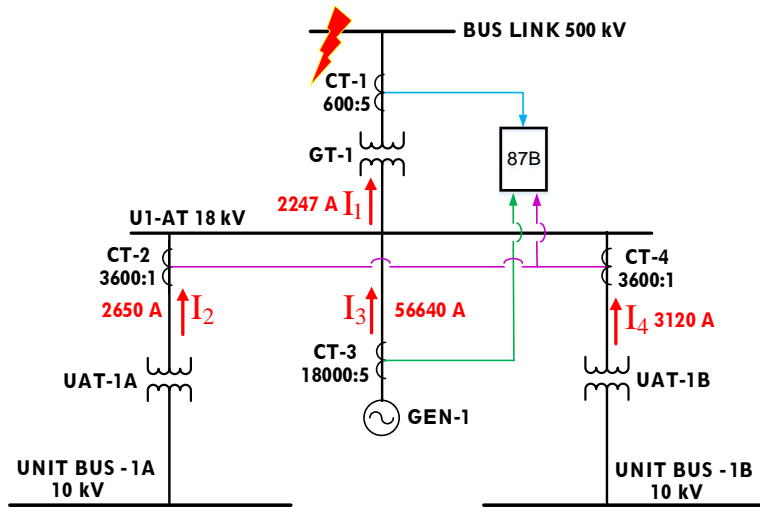
Gambar 4.8 Pemodelan 87B saat hubungsingkat 3 phasa di UNIT BUS-1B

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_3 - (I_2 + I_4) \\
 -\frac{340}{600/5} &= \frac{3930}{18000/5} - \left(-\frac{183}{3600/1} + \frac{13550}{3600/1} \right) \\
 -2,833 &= 1,092 - (0,051 + 3,764) \\
 -2,833 &\neq -2,621 \\
 \\
 I_{Restrained} &= \max(|I_p|, |I_s|) \\
 &= \max(|-2,833|, |-2,621|) \\
 &= 2,833 \text{ A} \\
 \\
 I_{diff} &= |I_p - I_s| \\
 &= |-2,833 + 2,621| \\
 &= \mathbf{0,212 \text{ A}} \\
 \\
 I_{diff} (\%) &= \frac{0,212}{5} \times 100\% \\
 &= \mathbf{4,23 \%} \\
 \\
 Slope (\%) &= \frac{I_{diff}}{I_{Restrained}} \times 100\% \\
 &= \frac{0,212}{2,817} \times 100\% \\
 &= \mathbf{7,5 \%}
 \end{aligned}$$

Gangguan Eksternal 3 Phasa di BUS LINK 500 kV

Ketika terjadi hubung singkat 3 Phasa di Bus A 500 kV, maka seluruh arus akan menuju pada titik gangguan. Hal tersebut menyebabkan perubahan arah arus yang melalui feeder UAT-1A dan UAT-1B. Perubahan

arah arus ditunjukkan dengan tanda negatif I_2 dan I_4 pada persamaan $I_1 = I_3 - (I_2 + I_4)$. Nilai arus hubung singkat 3 fasa $\frac{1}{2}$ cycle pada Bus A 500 kV dan pemodelan rele diferensial ketika terjadi hubung singka t3 fasa di BUS LINK 500kV dapat dilihat pada gambar 4.9.



Gambar 4.9 Pemodelan 87B saat hubungsingkat 3 fasa di BUS LINK

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_3 - (I_2 + I_4) \\
 \frac{2247}{600/5} &= \frac{56640}{18000/5} - \left(-\frac{2650}{3600/1} - \frac{3120}{3600/1} \right) \\
 18,725 &= 15,733 - (-0,736 - 0,867) \\
 18,725 &\neq 17,62 \\
 I_{Restrain} &= \max(|I_p|, |I_s|) \\
 &= \max(|18,725|, |17,62|) \\
 &= 18,725 \\
 I_{diff} &= |I_p - I_s|
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= |18,725 - 17,62| \\
&= 1,389 \text{ A} \\
I_{diff} (\%) &= \frac{1,389}{5} \times 100\% \\
&= \mathbf{27,8 \%} \\
Slope (\%) &= \frac{I_{diff}}{I_{Resraint}} \times 100\% \\
&= \frac{1,389}{18,725} \times 100\% \\
&= \mathbf{7,42 \%}
\end{aligned}$$

Dalam hal ini :

- I_p merupakan arus yang terukur pada sekunder CT₁ (CT yang terpasang pada *incoming* bus U1-AT 18 kV)
- I_s merupakan arus yang terukur pada sekunder CT₂, CT₃, dan CT₄ (CT yang terpasang pada *outgoing* bus U1-AT 18 kV)
- I_{diff} merupakan selisih antara arus yang terukur pada CT sisi *incoming* dengan arus yang terukur pada CT-CT sisi *outgoing* bus U1-AT 18 kV.
- Slope merupakan perbandingan antara I_{diff} dengan $I_{Resraint}$

Berdasarkan perhitungan I_{diff} dan slope ketika kondisi normal dan gangguan di luar daerah pengamanan baik hubung singkat antar fasa (L-L) maupun tiga fasa (L-L-L) dapat diketahui :

- Nilai I_{diff} terbesar adalah 28%
- Nilai slope terbesar adalah 11,62%

Rele diferensial tidak boleh bekerja saat kondisi normal maupun ketika terjadi gangguan di luar zona pengamanan rele. Oleh karena itu, rekomendasi *setting* yang disarankan berdasarkan perhitungan adalah:

- **Setting *pickup***
 Dalam hal ini terdapat 2 alternatif *setting pickup* yaitu sebagai berikut :

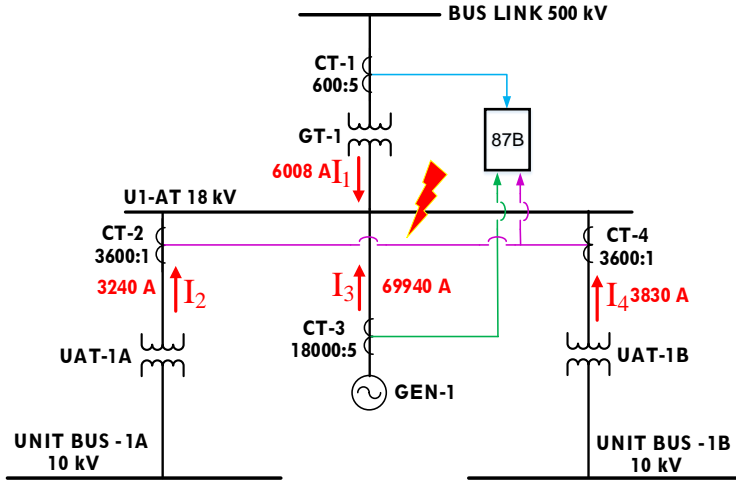
1. Setting *pickup* dengan memperhatikan *error CT*, I_{diff} kondisi normal, dan *margin* (faktor keamanan) dengan kriteria sebagai berikut :
 - a. Error CT diperoleh dari *CT Class*. CT menggunakan *CT class 5P20* dengan *error CT* $\pm 5\%$
 - b. I_{diff} kondisi normal : $10\% I_n$
 - c. *Margin* (faktor keamanan) diasumsikan 5%
$$\begin{aligned}
 \text{Setting pickup} &= (\text{error CT} + I_{diff} \text{ normal} + \text{margin}) \\
 &= (10\% + 10\% + 5\%) I_n \\
 &= 25\% I_n \\
 &= 0,25 I_n \\
 &= \mathbf{1,25 A}
 \end{aligned}$$
2. Setting *pickup* berdasarkan I_{diff} terbesar ($\text{pickup} > 0,28 I_n$)
 Setting *pickup* dipilih = **30% $I_n = 0,3 I_n = 1,5 A$** (*GE Multilin B30 Bus Differential System range 0,05 I_n - 6 I_n in steps of 0,001*)
 - Setting **slope = 75%** (*GE Multilin B30 Bus Differential System range 15% - 100% in steps of 1*)

Pertimbangan pemilihan setting slope sebesar 75% adalah untuk mengantisipasi kemungkinan terburuk rele tidak stabil ketika terjadi gangguan eksternal dan saturasi CT. Kedua setting tersebut (I_{diff} dan slope) diatur dengan logika AND sehingga rele diferensial akan bekerja hanya jika terjadi gangguan yang nilai I_{diff} dan slope nya melewati setting yang telah diatur.

Untuk menguji hasil dari *setting* yang ditentukan sudah tepat, maka dilakukan perhitungan ketika terjadi gangguan internal yaitu gangguan hubung singkat antar fasa (L-L) dan tiga fasa (L-L-L).

Gangguan Internal L-L di BUS U1-AT 18 kV

Ketika terjadi gangguan hubung singkat L-L di Bus U1-AT 18 kV, maka seluruh arus akan menuju pada titik gangguan tersebut. Hal ini menyebabkan perubahan arah arus yang melalui feeder UAT-1A, UAT-1B, dan GT-1. Perubahan arah arus ditunjukkan dengan tanda negatif I_1 , I_2 , dan I_4 pada persamaan $I_1 = I_3 - (I_2 + I_4)$. Nilai arus hubung singkat L-L $\frac{1}{2}$ cycle pada Bus U1-AT 18 kV dan pemodelan rele diferensial ketika terjadi hubung singkat L-L di Bus U1-AT 18 kV dapat dilihat pada gambar 4.10.



Gambar 4.10 Pemodelan 87B saat hubungsingkat L-L di U1-AT 18 kV

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_3 - (I_2 + I_4) \\
 -\frac{6008}{600/5} &= \frac{69940}{18000/5} - \left(-\frac{3240}{3600/1} - \frac{3830}{3600/1} \right) \\
 -50,067 &= 19,43 - (0,9 - 1,064) \\
 -50,067 &\neq 21,392 \\
 I_{\text{restraint}} &= \max(|I_p|, |I_s|) \\
 &= \max(|-50,067|, |21,392|) \\
 &= 50,067 \text{ A} \\
 I_{\text{diff}} &= |I_p - I_s| \\
 &= |-50,067 - 21,392| \\
 &= \mathbf{71,46 \text{ A}}
 \end{aligned}$$

$$I_{diff} (\%) = \frac{71,46}{5} \times 100\%$$

$$= 1429,2 \%$$

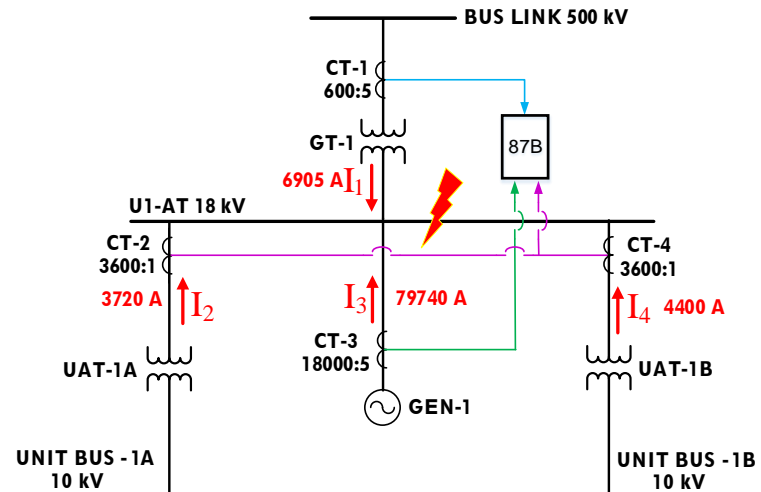
$$Slope (\%) = \frac{I_{diff}}{I_{Restrained}} \times 100\%$$

$$= \frac{71,46}{50,067} \times 100\%$$

$$= 142,7 \%$$

Gangguan Internal 3 Fasa di BUS U1-AT 18 kV

Ketika terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa di Bus U1-AT 18 kV, maka seluruh arus akan menuju pada titik gangguan tersebut. Hal ini menyebabkan perubahan arah arus yang melalui feeder UAT-1A, UAT-1B, dan GT-1. Perubahan arah arus ditunjukkan dengan tanda negatif I_1 , I_2 , dan I_4 pada persamaan $I_1 = I_3 - (I_2 + I_4)$. Nilai arus hubung singkat 3 fasa $\frac{1}{2}$ cycle pada Bus U1-AT 18 kV dan pemodelan rele diferensial ketika terjadi hubung singkat 3 fasa di Bus U1-AT 18 kV dapat dilihat pada gambar 4.11.

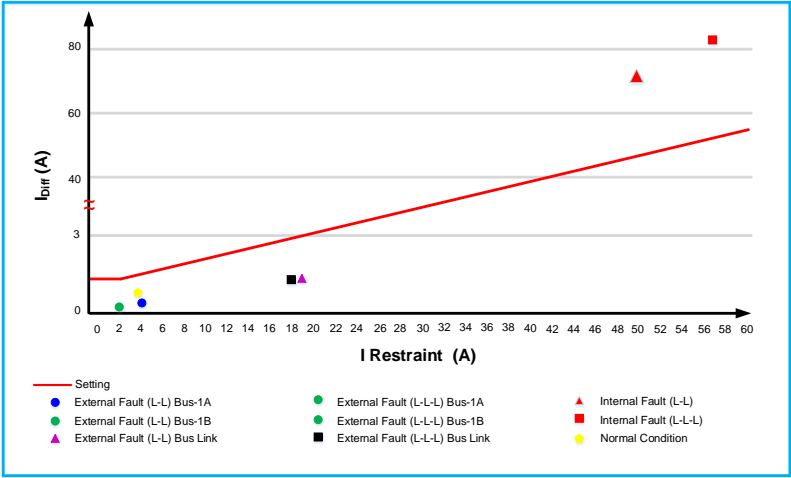


Gambar 4.11 Pemodelan 87B saat hubungsingkat 3 phasa di Bus U1-AT 18 kV

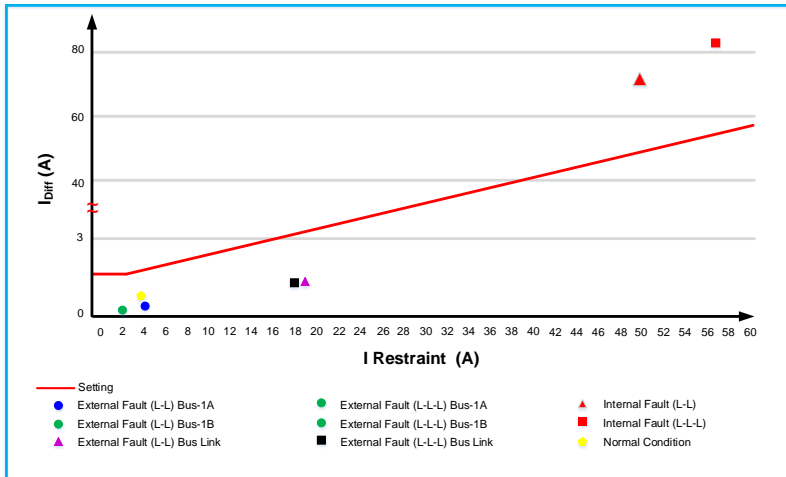
$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_3 - (I_2 + I_4) \\
 -\frac{6905}{600/5} &= \frac{79740}{18.000/5} - \left(-\frac{3720}{3600/1} - \frac{4000}{3600/1} \right) \\
 -57,542 &= 22,15 - (1,033 - 1,111) \\
 -57,542 &\neq 24,41 \\
 I_{\text{Restraint}} &= \max(|I_p|, |I_s|) \\
 &= \max(|-57,542|, |24,41|) \\
 &= 57,542 \text{ A} \\
 I_{\text{diff}} &= |I_p - I_s| \\
 &= |-57,542 - 24,41| \\
 &= \mathbf{81,95 \text{ A}} \\
 I_{\text{diff}} (\%) &= \frac{81,95}{5} \times 100\% \\
 &= \mathbf{1638,95 \%} \\
 \text{Slope} (\%) &= \frac{I_{\text{diff}}}{I_{\text{Restrain}}} \times 100\% \\
 &= \frac{81,95}{57,542} \times 100\% \\
 &= \mathbf{142,4 \%}
 \end{aligned}$$

Saat terjadi gangguan hubung singkat antar fasa (L-L) pada Bus U1-AT 18 kV, slope yang terukur adalah sebesar 142,7%, dan I_{diff} sebesar 1429,2% In atau 14,292 In. Kedua nilai tersebut jauh lebih besar daripada *setting* slope dan I_{diff} yang telah dipilih, dimana *setting* slope 75% dan

setting I_{diff} sebesar 0,6In. Karena kedua syarat terpenuhi, yaitu kedua *setting* telah terlampaui (*pick up*), maka rele diferensial akan bekerja dengan memberi perintah *tripping* CB dalam waktu 0,02s (*range* ½ - 4 *cycle*). Gambar 4.12 menunjukkan kurva karakteristik rele diferensial simulasi gangguan di dalam maupun di luar zona pengamanan rele untuk I_{diff} pickup = 1,25 A sedangkan gambar 4.13 menunjukkan kurva karakteristik rele diferensial beserta simulasi gangguan di dalam maupun di luar zona pengamanan rele untuk I_{diff} pickup = 1,5 A .



Gambar 4.12 Kurva karakteristik rele diferensial (I_{diff} pickup = 1,25 A)



Gambar 4.13 Kurva karakteristik rele diferensial (I_{diff} pickup = 1,5 A)

Daerah di atas kurva merupakan daerah kerja rele. Rele diferensial akan bekerja apabila gangguan yang terjadi berada di atas kurva karakteristik rele. Berdasarkan gambar 4.12 dan 4.13 di atas dapat dilihat bahwa ketika terjadi gangguan internal bus baik gangguan 2 phasa maupun gangguan 3 phasa, keduanya berada di atas kurva *setting* slope rele, dengan kata lain rele diferensial akan bekerja. Sedangkan saat terjadi gangguan di luar zona pengamanan rele, maka rele diferensial tidak akan bekerja. Pemilihan *pickup* baik 1,25 A maupun 1,5 A merupakan *setting* yang tepat.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan analisa yang telah dilakukan mengenai evaluasi setting rele diferensial busbar 18 kV pada sistem kelistrikan di PLTU UP Paiton Unit 1, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Penggunaan rele diferensial pada Bus U1-AT 18 kV berfungsi sebagai pengaman utama busbar karena sifatnya yang cepat dan selektif mengamankan gangguan.
2. Zona proteksi rele diferensial bus dibatasi oleh CT-CT yang terpasang pada sisi *incoming* dan *outgoing* daerah pengamanan rele.
3. *Setting* rele diferensial busbar U1-AT 18 kV pada kondisi eksisting terdapat kekeliruan. Pada kondisi gangguan eksternal, tidak memenuhi *range mismach* yang diperbolehkan sehingga menyebabkan rele diferensial bekerja. Atau dengan kata lain karena terdapat perbedaan kondisi eksisting antara kondisi normal dan gangguan mencapai 294 77% yang lebih besar dari *mismatch* relay (35%), maka rele diferensial 87B akan mengirimkan sinyal trip pada *circuit breaker* ketika terjadi gangguan eksternal.
4. *Setting* rele diferensial memperhatikan nilai I_{diff} dan slope ketika kondisi normal dan ketika terjadi gangguan di luar daerah pengamanan rele. Rele diferensial tidak boleh bekerja saat kondisi normal maupun ketika terjadi gangguan di luar zona pengamanan rele. Kedua fungsi tersebut (I_{diff} dan slope) diatur dengan logika AND sehingga rele diferensial akan bekerja hanya jika terjadi gangguan yang nilai I_{diff} dan slope nya melewati *setting* yang telah diatur.
5. Rekomendasi *setting* rele diferensial yang disarankan adalah I_{diff} *pickup* sebesar 1,25 A atau 1,5 A dan slope sebesar 75%, dimana *pickup* dapat dipilih berdasarkan nilai I_{diff} saat kondisi normal atau nilai I_{diff} yang terbesar. Setelah dilakukan pengecekan dengan gangguan antar fasa dan tiga fasa di dalam daerah

pengamanan rele, slope yang terukur adalah sebesar 142,7% dan 142,4% sedangkan I_{diff} sebesar 71,46 A dan 81,95A. Karena kedua *setting* terlewati (*pick up*), maka rele bekerja dalam waktu 0,02s. Sedangkan saat terjadi gangguan di luar zona pengamanan, rele ini tidak bekerja.

5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan yang telah diperoleh, saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya dengan topik serupa sebagai berikut:

1. Pada *setting* rele diferensial, sebaiknya mengaktifkan fungsi I_{diff} dan fungsi slope secara bersamaan untuk mengurangi faktor kesalahan kerja rele diferensial. Dengan memanfaatkan kedua fungsi tersebut, maka relay hanya akan bekerja saat kedua *setting* fungsi tersebut terlewati (*pick up*). Dengan kata lain, kedua fungsi tersebut diatur dengan logika AND.
2. Setting slope pada rele diferensial perlu mempertimbangkan kemungkinan terburuk terjadi gangguan eksternal dan saturasi CT.
3. Rekomendasi *setting* rele yang disarankan pada tugas akhir ini dapat dijadikan pertimbangan dan referensi untuk melakukan *setting* rele diferensial pada Bus U1-AT 18 kV.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE Std 242-2001™, “*IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, Ch. 15, 2001.
- [2] Holbach, J. “*Comparison between High Impedance and Low Impedance Bus Differential Protection*”, 2009 Power Systems Conference, Clemson, SC, 2009, pp. 1-16.
- [3] PT.PLN (Persero). “*Buku Pedoman O&M Pemeliharaan Proteksi dan Kontrol Busbar.*”
- [4] Tobing, Bonggas, L. 2012, “*Peralatan Tegangan Tinggi*,” Jakarta: Erlangga
- [5] PT.PLN (Persero). “*Buku Pedoman O&M Pemeliharaan Trafo Arus*”.
- [6] Cahier Technique No. 158, “*Calculation of Short-circuit Current*”, Schneider Electric, 2005.
- [7] Hirlanda Dwi, Andikta. “*Koordinasi Proteksi Pada Sistem Distribusi 33 kV PT. PERTAMINA RU IV Cilacap Akibat Penambahan Generator 3X15 MW*”. Tugas Akhir. Institut Teknologi Sepuluh Nopember: Surabaya, 2013.
- [8] PT. PLN (Persero). “*Konsep Dasar Sistem Proteksi Gardu Induk*”.
- [9] K. Behrendt, D. Costello and S. E. Zocholl, “*Considerations for using high-impedance or low-impedance relays for bus differential protection*,” 2010 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, 2010, pp. 1-15.
- [10] Setijasa, Hery. “*Pengujian Relay Diferensial GI*”, Jurnal Teknik Energi Vol 9, Semarang, Mei, 2013
- [11] “*IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power System Buses*”, in IEEE std C37.234-2009, vol., No., pp.C1-115, Nov. 5 2009
- [12] Instruction Manual, “*B30 Differential Power System for Version 7.4Ix*”, GE Multilin. 2017

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIOGRAFI PENULIS



Rizkaurum Nur Fadliyah, dilahirkan di Sukoharjo pada tanggal 14 Januari 1995. Merupakan anak kedua dari dua bersaudara pasangan Wagiyono dan Widayati. Penulis ini memulai jenjang pendidikan di TK/BA Aisyah Jetis pada tahun 1999-2001, Madrasah Ibtidaiyah Negeri Jetis pada tahun 2001-2007, kemudian SMP Negeri 1 Sukoharjo pada tahun 2007-2010, dan SMA Negeri 1 Sukoharjo pada tahun 2010-2013. Pada tahun 2013 penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di kota Surabaya tepatnya di Institut Teknologi

Sepuluh Nopember (ITS), Fakultas Teknologi Elektro, Departemen Teknik Elektro bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Selama kuliah, penulis aktif dalam berbagai kegiatan organisasi mahasiswa seperti menjadi Staff Departemen Riset dan Teknologi Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro ITS 2014/2015 yang kemudian menjadi Sekretaris Departemen pada periode 2015/2016, Asisten serta Koordinator Praktikum Pengukuran Listrik di Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga, serta berpartisipasi dalam berbagai kepanitiaan acara nasional. Pada semester VI penulis melakukan kerja praktek di Indonesia Power Tambak Lorok. Penghargaan yang pernah diterima penulis adalah Hibah Dikti Program Kreativitas Mahasiswa Bidang Karsa Cipta, Juara 1 Kategori Mahasiswa/Umum Lomba Karya Cipta Inovasi Energi Baru Terbarukan, Konversi Energi, dan Kelistrikan se-Gerbang Kertasusila dalam rangka HUT PEMKAB Gresik ke 42, dan Juara 1 Lomba Karya Cipta Ilmiah Nasional Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Penulis dapat dihubungi melalui email rizkaurum@gmail.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan